



Nádia Bárbara Pedro Alves

Licenciada em Engenharia Civil

Dimensionamento de pavimentos rodoviários: comparação entre diferentes metodologias

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil – Perfil de Geotecnia

Orientador: Doutor João Rocha de Almeida, Professor
Associado, FCT/UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutora Ildi Cismasiu
Arguente: Prof. Doutor Rui Micaelo
Vogal: Prof. Doutor João Rocha de Almeida

Dimensionamento de pavimentos rodoviários: comparação entre diferentes metodologias

“Copyright” Nádia Bárbara Pedro Alves, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

À minha filha, Constança.

Agradecimentos

Gostaria de expressar a minha gratidão a todos os que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

Em particular, gostaria de agradecer à Doutora Eng.^a. Conceição Azevedo, que me possibilitou trabalhar nesta área e me deu a formação indispensável dada a particularidade do tema.

Aos colegas com quem tenho colaborado ao longo destes anos de atividade profissional, em especial à Eng.^a Anabela Martins e Eng.^a Conceição Machado da Infraestruturas de Portugal (IP Engenharia SA), pela disponibilidade sempre demonstrada, na partilha de conhecimentos técnicos e na troca de experiências de casos de obra, que em muito contribuíram para a minha evolução profissional e aquisição de novos conhecimentos.

Às empresas com quem tenho colaborado, que me têm proporcionado participar em projetos nacionais e internacionais e que em muito contribuíram para que eu tivesse escolhido este tema de tese.

Gostaria igualmente de agradecer ao Professor João Rocha de Almeida por me ter orientado durante este trabalho, e por toda a compreensão que demonstrou para comigo na concretização do mesmo e pela disponibilidade e entusiasmo com que abraçou este projeto desde o primeiro contacto.

À minha mãe, Alice, e ao meu pai, Jorge, um especial agradecimento, pelos valores que sempre me transmitiram e porque lhes devo toda a educação e formação adquirida.

À minha irmã, Ana Clara, companheira de muitos anos.

Ao meu marido, Nuno que sempre me apoiou ao longo destes anos e que demonstra sempre disponibilidade para me ajudar e me inspira diariamente a querer fazer mais e melhor.

Aos meus amigos, colegas de faculdade e de trabalho um muito obrigado pela amizade, companheirismo e pelos muitos ensinamentos que me proporcionaram.

Resumo

A internacionalização da Engenharia Portuguesa tem requerido aos projetistas o conhecimento dos códigos e das práticas seguidas em países estrangeiros, nomeadamente nos países da África Austral, para a sua correta aplicação em estudos e projetos. Nos projetos de pavimentos flexíveis na África Austral, é usual exigir-se o cumprimento das normas Sul-africanas (SAPEM) ou do catálogo de pavimentos SATCC.

O estudo realizado pretende contribuir para um conhecimento mais aprofundado das normas vigentes na África do Sul (SAPEM), sendo que, dado o seu enquadramento regional e a qualidade técnica das mesmas, é provável que futuramente estas possam ser as normas de referência para o dimensionamento de pavimentos em países da África Austral (SADC). Pretendeu-se ainda comparar as metodologias de dimensionamento empírico-mecanicistas adotadas em Portugal e na África do Sul, realizando-se uma análise sistemática da caracterização do tráfego, das propriedades dos materiais e dos critérios de dimensionamento para as metodologias adotadas em Portugal e na África do Sul.

Numa primeira parte do estudo descrevem-se de forma detalhada os procedimentos usualmente adotados no dimensionamento de pavimentos rodoviários (flexíveis e semi-rígidos), abordando-se algumas temáticas relevantes, nomeadamente: espectro de eixos reais versus eixos equivalentes, temperatura anuais de projeto versus temperaturas mensais e cálculo do módulo de deformabilidade de misturas betuminosas novas com base em desenvolvimentos mais recentes.

No desenvolvimento do estudo, descrevem-se de forma detalhada as normas de projeto Sul-africanas (SAPEM) definidas com base num modelo empírico-mecanicista. Realizou-se uma análise comparativa tendo por base os procedimentos tradicionalmente adotados em Portugal.

Realizou-se ainda uma descrição detalhada do dimensionamento de pavimentos com base no manual SATCC. Para uma dada temperatura do ar, analisaram-se 72 secções do catálogo SATCC recorrendo às metodologias de dimensionamento de base racional e verificando a sua adequação à exigência das mesmas.

Por fim, apresentam-se as conclusões mais pertinentes relativas ao estudo realizado e são sugeridos alguns desenvolvimentos futuros, com o intuito de contribuir para a internacionalização da Engenharia Rodoviária Portuguesa, nomeadamente nos países da SADC.

Palavras-chave

Dimensionamento de pavimentos, Via empírico-mecanicista, Experiência Portuguesa, Espectro de tráfego, Normas Sul-africanas, Manual SATCC, Análise comparativa.

Abstract

The internationalization of Portuguese Engineering has required the designers to learn and apply codes and practices followed in foreign countries. For the design of flexible pavements in Southern Africa countries (SADC), it is usual to adopt the South African standards or the SATCC pavement design catalogue.

This work intends to contribute to a more in depth knowledge of the pavement design guidelines adopted in South Africa (SAPEM). Given its technical quality and the South Africa regional influence it is likely that in the near future the countries belonging to the SADC will adopt similar design guidelines. It was also intended to compare the empirical-mechanistic methodologies adopted in South Africa and in Portugal, through a systematic analysis of traffic characterization, material properties and design criteria.

In the first part of the work, the details of the pavement design procedure currently used in the design of road pavements (flexible and semi-rigid) are presented. Some relevant issues are referred, namely: spectrum axes versus equivalent axes, annual temperature design versus monthly temperature design and procedures to predict the deformability moduli of new bituminous mixtures.

Following, the pavement design standards adopted in South Africa that are based on an empirical-mechanistic model are presented. A comparative analysis with the procedures traditionally adopted in Portugal is carried out. The pavement design manual SATCC is also described. For a given air temperature, 72 SATCC structural sections are verified, using the referred empirical mechanistic approaches, in order to assess if the SATCC catalogue structures comply with the requirements of the described empirical mechanistic designs.

Finally, the most relevant conclusions of the study are presented and future developments are suggested, aiming to improve road pavement design in Portugal and to contribute to its internationalization, namely in the countries of Southern Africa.

Keywords

Pavement design, Empirical-mechanical methods, Portuguese methodology, South African methodology, SATCC pavement catalogues, Comparative analysis.

Índice

1 Introdução.....	1
1.1 Enquadramento do tema.....	1
1.2 Objetivos do trabalho	1
1.3 Estrutura da dissertação	2
2 Dimensionamento de pavimentos rodoviários: Experiência Portuguesa	3
2.1 Considerações gerais.....	3
2.2 Período de dimensionamento	5
2.3 Tráfego.....	5
2.3.1 Caracterização do tráfego	5
2.3.2 Eixo-padrão equivalente (fator de agressividade).....	6
2.3.3 Espetro de tráfego	9
2.4 Condições climáticas.....	14
2.4.1 Temperaturas de serviço em misturas betuminosas	14
2.5 Condições de fundação	18
2.6 Materiais de pavimentação	21
2.6.1 Misturas betuminosas fabricadas a quente	21
2.6.2 Materiais granulares	27
2.6.3 Materiais com ligantes hidráulicos	29
2.7 Critérios de dimensionamento	30
2.7.1 Solos de fundação	31
2.7.2 Misturas betuminosas.....	31
2.7.3 Materiais com ligantes hidráulicos	32
2.7.4 Lei de Miner	32
2.8 Análise estrutural.....	33
2.9 Aplicações	35
2.9.1 Espetro de eixos versus eixo padrão	35
2.9.2 Temperatura equivalente mensal versus temperatura equivalente anual	40
2.9.3 Previsão do módulo de deformabilidade: Método UN versus fórmula de Witczak	43
2.10 Conclusões.....	47
3 Manual de dimensionamento de pavimentos rodoviários da África do Sul (SAPEM).....	49
3.1 Considerações gerais.....	49
3.2 Período de dimensionamento	49

3.3	Estratégias de ciclos de vida.....	50
3.4	Tráfego.....	51
3.4.1	Caraterização do tráfego.....	51
3.4.2	Eixo-Padrão equivalente (fator de agressividade)	52
3.4.3	Espetro de tráfego	55
3.5	Condições de fundação	56
3.6	Materiais de pavimentação	57
3.6.1	Materiais granulares	57
3.6.2	Misturas betuminosas fabricadas a quente	58
3.6.3	Materiais com ligantes hidráulicos	59
3.7	Critérios de dimensionamento	60
3.7.1	Solos de fundação.....	61
3.7.2	Misturas betuminosas.....	63
3.7.3	Materiais com ligantes hidráulicos	67
3.7.4	Materiais granulares	70
3.8	Aplicações	72
3.8.1	Pavimento flexível: camada de base e sub-base granular	72
3.8.2	Pavimento flexível: camada de base granular e sub-base estabilizada com cimento.....	75
3.9	Conclusões.....	79
4	Manual de dimensionamento de pavimentos rodoviários da SATCC.....	81
4.1	Considerações gerais.....	81
4.2	Período de dimensionamento	82
4.3	Tráfego	83
4.3.1	Caraterização do tráfego.....	83
4.3.2	Classe de tráfego	83
4.4	Condições de fundação	83
4.5	Condições climáticas.....	84
4.6	Materiais de pavimentação	85
4.7	Solução estrutural	86
4.8	Aplicações	88
4.8.1	Pavimento flexível localizado em Luanda: Base e sub-base granular.....	88
4.8.2	Pavimento flexível localizado em Namibe: Base granular e sub-base estabilizada com cimento	89
4.9	Conclusões.....	90
5	Análise comparativa das diferentes metodologias apresentadas.....	91

5.1	Considerações gerais.....	91
5.2	Modelos estruturais	92
5.2.1	Modelo SAPEM	94
5.2.1	Modelo Metodologia Portuguesa.....	95
5.3	Catálogo D1	95
5.4	Catálogo D4	97
5.5	Catálogo D5	99
5.6	Catálogo W1.....	101
5.7	Catálogo W4.....	104
5.8	Catálogo W5.....	106
5.9	Conclusões.....	108
6	Considerações Finais	109
6.1	Conclusões.....	109
6.2	Desenvolvimentos Futuros.....	111
	Bibliografia	113
	Anexos	117
	Anexo I – Estruturas de pavimentos do catálogo do SATCC adotadas na verificação estrutural realizada	119
	Anexo II – Verificação estrutural das estruturas de pavimentos do catálogo do SATCC	167
	Anexo III – Acréscimo de espessura em misturas betuminosas das estruturas do Catálogo SATCC que verificam um dimensionamento empírico-mecanicista	215

Índice de Figuras

Figura 2.1 – Dimensionamento de pavimentos rodoviários (flexíveis e semi-rígidos) por via empírica-mecanicista, adaptado de Azevedo (1993).	4
Figura 2.2 – Gráfico Fator de ponderação/Temperatura média do ar, Claessen et al. (1977)	15
Figura 2.3 – Temperatura de projeto para a estação climatológica de Faro	16
Figura 2.4 – Temperatura de projeto de camadas betuminosas, Claessen et al. (1977)	17
Figura 2.5 – Temperatura de projeto das camadas betuminosas em função da profundidade para vários valores da temperatura do ar	17
Figura 2.6 – Variação do módulo de deformabilidade em misturas betuminosas (desgaste e base) para uma classe de betume 35/50 segundo a metodologia UN e segundo a equação de Witczak	27
Figura 2.7 – Curvas granulométricas limite para material do tipo agregado britado em granulometria extensa (ABGE) em camada de sub-base e base, EP (2014)	29
Figura 2.8 – Critérios de dimensionamento para pavimentos rodoviários	31
Figura 2.9 – Modelo de análise multicamada em coordenadas cilíndricas	34
Figura 2.10 – Modelo de análise para verificação estrutural – Metodologia UN	35
Figura 2.11 – Modelo de análise para verificação estrutural – Metodologia de Witczak	44
Figura 3.1 – Estratégias de ciclos de vida possíveis para uma nova estrutura de pavimento flexível .	51
Figura 3.2 – Critérios de dimensionamento em função do tipo de material, de acordo com o SAMDM indicado em SAPEM (SANRAL, 2014)	61
Figura 3.3 – Critérios de dimensionamento para controlo da deformação permanente do solo de fundação SAPEM (SANRAL, 2014) e comparação com o critério de deformação permanente da Shell (1978)	63
Figura 3.4 – Critérios de dimensionamento para controlo da fadiga em misturas SAPEM (SANRAL, 2014) e comparação com o critério de fadiga da Shell (1978) em camadas de desgaste com granulometria contínua	64
Figura 3.5 – Critérios de dimensionamento para controlo da fadiga em misturas SAPEM (SANRAL, 2014) e comparação com o critério de fadiga da Shell (1978) em camadas de base para módulos de deformabilidade de 1000 MPa e 2000 MPa (SF unitário)	65
Figura 3.6 – Critérios de dimensionamento para controlo da fadiga em misturas SAPEM (SANRAL, 2014) e comparação com o critério de fadiga da Shell (1978) em camadas de base para módulos de deformabilidade de 3000 MPa e 5000 MPa (SF unitário)	66
Figura 3.7 – Critérios de dimensionamento para controlo da fadiga em misturas SAPEM (SANRAL, 2014) e comparação com o critério de fadiga da Shell (1978) em camadas de base para módulos de deformabilidade de 3000 MPa e 5000 MPa (SF = 3,69 para 80 mm e SF = 7,11 para 150 mm)	67
Figura 3.8 – Critérios de dimensionamento para controlo da fadiga em materiais tratados com ligantes hidráulicos SAPEM (SANRAL, 2014) e comparação com o critério de fadiga proposto em JAE (1995) para materiais com ligantes hidráulicos – SF = 2,63 correspondente a uma espessura de 250 mm ..	69
Figura 3.9 – Critérios de dimensionamento para controlo de esmagamento em materiais tratados com ligantes hidráulicos, SAPEM (SANRAL, 2014)	69

Figura 3.10 – Critérios de dimensionamento relativos ao controlo de deformação permanente em camadas com materiais granulares, SAPEM (SANRAL, 2014)	71
Figura 3.11 – Ajustamento dos valores de tensão principal a considerar no critério de dimensionamento à deformação permanente, SAPEM (SANRAL, 2014)	72
Figura 3.12 – Modelo de análise para verificação estrutural (camada de base e sub-base granular) – Metodologia SAPEM (SANRAL, 2014)	73
Figura 3.13 – Modelo de análise para verificação estrutural (camada de base granular e sub-base estabilizada com cimento) – Metodologia SAPEM (SANRAL, 2014)	76
Figura 4.1 – Países onde o manual SATCC pode ser adotado, retirado de http://www.sadc.int/member-states/	82
Figura 4.2 – Solução estrutural para zona húmida, classe de tráfego T6, classe de fundação S4 e tipologia de material granular em camada de base e sub-base	88
Figura 4.3 – Solução estrutural para zona seca, classe de tráfego T8, classe de fundação S3 e tipologia de material granular em camada de base e sub-base granular estabilizada com cimento	89
Figura 5.1 – Temperatura de projeto para a estação climatológica localizada na cidade de Namibe, Angola	94
Figura 5.2 – Verificação das estruturas do catálogo SATCC com base no SAPEM – Catálogo D1 – Classes de fundação S2 a S5 e classes de tráfego T6 a T8 – Categorias D e A	96
Figura 5.3 – Verificação das estruturas do catálogo SATCC com base na metodologia Portuguesa – Catálogo D1 – Classes de fundação S2 a S5 e classes de tráfego T6 a T8	96
Figura 5.4 – Verificação das estruturas do catálogo SATCC com base no SAPEM – Catálogo D4 – Classes de fundação S2 a S5 e classes de tráfego T6 a T8 – Categorias D e A	98
Figura 5.5 – Verificação das estruturas do catálogo SATCC com base na metodologia Portuguesa – Catálogo D4 – Classes de fundação S2 a S5 e classes de tráfego T6 a T8	98
Figura 5.6 – Verificação das estruturas do catálogo SATCC com base no SAPEM – Catálogo D5 – Classes de fundação S2 a S5 e classes de tráfego T6 a T8 – Categorias D e A	100
Figura 5.7 – Verificação das estruturas do catálogo SATCC com base na metodologia Portuguesa – Catálogo D5 – Classes de fundação S2 a S5 e classes de tráfego T6 a T8	101
Figura 5.8 – Verificação das estruturas do catálogo SATCC com base no SAPEM – Catálogo W1 – Classes de fundação S2 a S5 e classes de tráfego T6 a T8 – Categorias D e A	102
Figura 5.9 – Verificação das estruturas do catálogo SATCC com base na metodologia Portuguesa – Catálogo W1 – Classes de fundação S2 a S5 e classes de tráfego T6 a T8	103
Figura 5.10 – Verificação das estruturas do catálogo SATCC com base no SAPEM – Catálogo W4 – Classes de fundação S2 a S5 e classes de tráfego T6 a T8 – Categorias D e A	105
Figura 5.11 – Verificação das estruturas do catálogo SATCC com base na metodologia Portuguesa – Catálogo W4 – Classes de fundação S2 a S5 e classes de tráfego T6 a T8	105
Figura 5.12 – Verificação das estruturas do catálogo SATCC com base no SAPEM – Catálogo W5 – Classes de fundação S2 a S5 e classes de tráfego T6 a T8 – Categorias D e A	107
Figura 5.13 – Verificação das estruturas do catálogo SATCC com base na metodologia Portuguesa – Catálogo W5 – Classes de fundação S2 a S5 e classes de tráfego T6 a T8	107

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 – Classificação de veículos automóveis pesados de acordo com JAE (1995), adaptado de Brás (2012)	5
Tabela 2.2 – Distribuição do tráfego pesado na via mais solicitada JAE (1995)	6
Tabela 2.3 – Classes de tráfego preconizadas em JAE (1995), incluindo taxas de crescimento	6
Tabela 2.4 – Eixos padrão adotados no dimensionamento de pavimentos rodoviários em Portugal	7
Tabela 2.5 – Fatores de agressividade de tráfego para eixos padrão de 80 kN e de 130 kN a adotar no dimensionamento de pavimentos rodoviários, JAE (1995).....	8
Tabela 2.6 – Tipologia de eixos de veículos pesados	9
Tabela 2.7 – Valores de β e k para conversão de eixos	9
Tabela 2.8 – Espectro de cargas por eixos, Sousa-Melo (1993) e Brás (2012).....	11
Tabela 2.9 – Distribuição média do espectro de veículos pesados em função da categoria, Sousa-Melo (1993) e Brás (2012)	12
Tabela 2.10 – Distribuição percentual do tráfego pesado por nível de carga, Sousa-Melo (1993) e Brás (2012)	12
Tabela 2.11 – Espectro de cargas por eixos para um valor unitário de veículos pesados no período de dimensionamento	13
Tabela 2.12 – Número de passagens de eixo padrão equivalente a adotar no dimensionamento de pavimentos para classes de tráfego T6 a T3 definidas em JAE (1995)	13
Tabela 2.13 – Cálculo da temperatura de projeto para a estação climatológica de Faro - normais climatológicas 1981-2010, IPMA (2010)	16
Tabela 2.14 – Classes de fundação definidas em JAE (1995)	20
Tabela 2.15 – Camadas de leito em materiais não ligados, JAE (1995)	20
Tabela 2.16 – Camadas de leito em materiais tratados com ligantes hidráulicos, JAE (1995)	20
Tabela 2.17 – Camadas em misturas betuminosas tradicionais fabricadas a quente – Composição volumétrica e penetração nominal	24
Tabela 2.18 – Viscosidade dinâmica – Valores de referência de A e VTS, Chomicz-Kowalska (2015)	26
Tabela 2.19 – Parâmetros da equação de Witczak – Valores de referência da curva granulométrica, Branco et al. (2008)	26
Tabela 2.20 – Camadas não ligadas – Requisitos dos agregados britados, EP (2014)	29
Tabela 2.21 – Valores de referência das características mecânicas dos materiais com ligantes hidráulicos, JAE (1985) e Antunes (1993).....	30
Tabela 2.22 – Eixos tipo adotados na verificação por espectro de eixos, MnPave (2008)	36
Tabela 2.23 – Verificação estrutural para o pavimento tipo F1	37
Tabela 2.24 – Verificação estrutural para o pavimento tipo F2.....	38
Tabela 2.25 – Verificação estrutural para o pavimento tipo F3.....	39
Tabela 2.26 – Verificação estrutural para o pavimento tipo SR1	40
Tabela 2.27 – Verificação estrutural para o pavimento tipo SF1 – Temperatura mensal versus anual	41

Tabela 2.28 – Verificação estrutural para o pavimento tipo SF2 – Temperatura mensal versus anual	42
Tabela 2.29 – Verificação estrutural para o pavimento tipo SF3 – Temperatura mensal versus anual	42
Tabela 2.30 – Verificação estrutural para o pavimento tipo SR1 – Temperatura mensal versus anual	43
Tabela 2.31 – Verificação estrutural para o pavimento tipo SF1 – Previsão do módulo de deformabilidade segundo Witczak	45
Tabela 2.32 – Verificação estrutural para o pavimento tipo SF2 – Previsão do módulo de deformabilidade segundo Witczak	45
Tabela 2.33 – Verificação estrutural para o pavimento tipo SF3 – Previsão do módulo de deformabilidade segundo Witczak	46
Tabela 2.34 – Verificação estrutural para o pavimento tipo SR1 – Previsão do módulo de deformabilidade segundo Witczak	46
Tabela 3.1 – Categorias de estrada, SAPEM (SANRAL, 2014)	50
Tabela 3.2 – Limites legais de carga por eixo, SAPEM (SANRAL, 2014)	52
Tabela 3.3 – Eixos padrão tipo adotados no dimensionamento de pavimentos rodoviários na África do Sul.....	52
Tabela 3.4 – Expoente β para conversão de passagens para o eixo padrão equivalente	53
Tabela 3.5 – Distribuição do tráfego pesado por via, SAPEM (SANRAL, 2014)	54
Tabela 3.6 – Taxas de crescimento de crescimento de tráfego, SAPEM (SANRAL, 2014).....	54
Tabela 3.7 – Valores de fator de agressividade (FA) e correspondente taxa de crescimento, SAPEM (SANRAL, 2014).....	54
Tabela 3.8 – Classes de tráfego adotadas no TRH4 (1996) e correspondentes valores de referência de passagens de eixo-padrão equivalente de 80 kN	55
Tabela 3.9 – Profundidade de prospeção, SAPEM (SANRAL, 2014)	56
Tabela 3.10 – Intervenções que garantem um solo de fundação com características resistentes mínimas, SAPEM (SANRAL, 2014)	56
Tabela 3.11 – Módulo de deformabilidade a adotar em solos de fundação	57
Tabela 3.12 – Módulo de deformabilidade a adotar em camadas em materiais granulares, SAPEM (SANRAL, 2014).....	58
Tabela 3.13 – Módulo de deformabilidade das misturas betuminosas, SAPEM (SANRAL, 2014)	58
Tabela 3.14 – Módulo de deformabilidade das misturas betuminosas, Theysen e Mutten (2000)	59
Tabela 3.15 – Valores de referência das características mecânicas de solos estabilizados com cimento, SAPEM (SANRAL, 2014)	59
Tabela 3.16 – Constante (A) para o critério de deformação permanente do solo de fundação, SAPEM (SANRAL, 2014).....	62
Tabela 3.17 – Constantes (α e β) para o critério de fadiga em misturas betuminosas, SAPEM (SANRAL, 2014).....	64
Tabela 3.18 – Constantes para o critério de fadiga, início de esmagamento e esmagamento avançado em materiais estabilizados com ligantes hidráulicos, SAPEM (SANRAL, 2014)	68
Tabela 3.19 – Constantes para o critério de deformações permanentes por corte em materiais granulares, SAPEM (SANRAL, 2014)	71

Tabela 3.20 – Valores de ângulo de atrito e coesão a adotar no critério de deformações permanentes por corte em materiais granulares, SAPEM (SANRAL, 2014)	71
Tabela 3.21 – Verificação estrutural para o pavimento com camada granular em base e sub-base – Metodologia SAPEM (SANRAL, 2014) - Dano de 0,750	74
Tabela 3.22 – Verificação estrutural para o pavimento com camada granular em base e sub-base – Metodologia Portuguesa – Estrutura SAPEM (SANRAL, 2014) - Dano de 0,251	74
Tabela 3.23 – Verificação estrutural para o pavimento com camada granular em base e sub-base – Metodologia Portuguesa – Estrutura retificada - Dano de 0,611	75
Tabela 3.24 – Verificação estrutural para o pavimento com camada granular em base e sub-base estabilizada com cimento – Metodologia SAPEM (SANRAL, 2014) – Dano de 0,741	76
Tabela 3.25 – Verificação estrutural para o pavimento com camada granular em base e sub-base estabilizada com cimento – Metodologia Portuguesa – Estrutura SAPEM (SANRAL, 2014) – Dano de 0,972.....	77
Tabela 3.26 – Verificação estrutural para o pavimento com camada granular em base e sub-base estabilizada com cimento – Estrutura retificada - Dano de 3,477	78
Tabela 4.1 – Guia para seleção do período de dimensionamento, SATCC (CSIR, 1998)	82
Tabela 4.2 – Classes de tráfego, SATCC (CSIR, 1998)	83
Tabela 4.3 – Classes de fundação, SATCC (CSIR, 1998)	84
Tabela 4.4 – Método de escolha do valor de CBR de solos de fundação, SATCC (CSIR, 1998).....	84
Tabela 4.5 – Profundidade de prospeção em função da classe de fundação, SATCC (CSIR, 1998)..	84
Tabela 4.6 – Critério de seleção da região climática de dimensionamento de acordo com o nível de humidade, SATCC (2014)	85
Tabela 4.7 – Critério de seleção da região de dimensionamento em zonas húmidas, SATCC (2014)	85
Tabela 4.8 – Materiais de pavimentação adotados no catálogo SATCC (CSIR, 1998)	86
Tabela 4.9 – Tipologia de estruturas disponíveis no catálogo SATCC (CSIR, 1998).....	86
Tabela 4.10 – Catálogo de pavimentos para a região D1 (camada de base e sub-base granular e região seca)	87
Tabela 5.1 – Cálculo da temperatura de projeto para a estação climatológica de Namibe (Angola) - normais climatológicas, INAMET (2016)	93
Tabela 5.2 – Verificação estrutural do catálogo D1 – Critérios de dimensionamento condicionantes .	97
Tabela 5.3 – Verificação estrutural do catálogo D4 – Critérios de dimensionamento condicionantes .	99
Tabela 5.4 – Verificação estrutural do catálogo D5 – Critérios de dimensionamento condicionantes	101
Tabela 5.5 – Verificação estrutural do catálogo W1 – Critérios de dimensionamento condicionantes	103
Tabela 5.6 – Verificação estrutural do catálogo W4 – Critérios de dimensionamento condicionantes	106
Tabela 5.7 – Verificação estrutural do catálogo D5 – Critérios de dimensionamento condicionantes	108

Lista de abreviaturas, siglas e símbolos

Abreviaturas e siglas

AASHTO – American Association of State Highway and Transport Officials

ABGE – Agregado britado de granulometria extensa

AGEC – Agregado britado de granulometria extensa estabilizado com cimento

BISAR – Bitumen Stress Analysis in Road

CG – Camada granular

CSIR – Council for Scientific and Industrial Research in South Africa

CBR – California bearing ratio

EP – Estradas de Portugal, IP (atual IP, SA)

LCPC – Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

JAE – Junta Autónoma de Estrada (extinta em 1999)

IMT – Instituto da mobilidade e dos transportes, IP

INAMET – Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica (Angola)

INIR – Instituto de Infraestruturas Rodoviárias, IP (Integrado no IMT em 2012)

IP – Infraestruturas de Portugal, SA

IPMA – Instituto Português do Mar e da Atmosfera

MB – Mistura betuminosa

SETRA – Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes

SADC – Southern Africa Development Community

SAMDM – South Africa Mechanistic-Empirical Design Method

SAPEM – South Africa Pavement Engineering manual

SATCC – Southern Africa Transport and Communications Commission

SC – Solo-cimento

SF – Solo de fundação

Símbolos

C – Fator de crescimento de tráfego

C_p – Termo angular para a lei de Mohr-Coulomb em materiais granulares

FA – Fator de agressividade

E^* – Módulo de deformabilidade dinâmico em misturas betuminosas

E – Módulo de deformabilidade do material

G – Módulo de distorção

IP_{rec} – Índice de penetração do betume

$N_{Pr o j e t o}$ – Número de passagens do eixo padrão equivalente

t – Taxa média de crescimento anual do tráfego pesado

t_c – Tempo de carregamento

Tab_{rec} – Temperatura de amolecimento

$TMDA_p$ – Tráfego médio diário anual de veículos pesados no ano de abertura, por sentido e na via mais solicitada

$T_{mistura}$ – Temperatura de projeto da mistura betuminosa

V_a – Percentagem volumétrica de agregados

V_b – Percentagem volumétrica de betume

V_v – Volume de vazios

p – Período de dimensionamento

v – Velocidade de projeto dos veículos pesados

ν - Coeficiente de Poisson do material

σ_d – Tensão deviatória

θ – Primeiro invariante do tensor de tensões

$\sigma_{t.mh}$ – Tensão horizontal de tração na base das camadas com ligantes hidráulicos

$\sigma_{1.cg}$ – Tensão principal I

$\sigma_{3.cg}$ – Tensão principal III

$\varepsilon_{v.sf}$ – Extensão vertical de compressão no solo de fundação

$\varepsilon_{t.mb}$ – Extensão horizontal de tração na base das misturas betuminosas

ε_{ultimo} – Extensão de rotura

η – Viscosidade dinâmica do betume

ϕ_p – Termo angular para a lei de Mohr-Coulomb em materiais granulares

1 Introdução

1.1 Enquadramento do tema

Após a autora desta dissertação ter concluído a licenciatura em engenharia civil e no âmbito da sua atividade de projetista de pavimentos rodoviários e aeroportuários, teve por diversas vezes a necessidade de conhecer e aplicar os manuais de dimensionamento de pavimentos rodoviários usualmente indicados como referência pelos donos de obra em países da África Austral, TRH4 (1996), SATCC (CSIR, 1998) e Ásia AASHTO (1993).

O dimensionamento de pavimentos rodoviários na África Austral tem especial interesse para as empresas portuguesas do sector rodoviário, pois a necessidade da sua internacionalização nestas zonas impõe a procura e o conhecimento de manuais e métodos de dimensionamento de estruturas de pavimentos em países de mercados emergentes de África.

Assim, a internacionalização da Engenharia Portuguesa tem requerido dos projetistas o conhecimento e aplicação de códigos e práticas seguidas noutros países. No projeto de pavimentos flexíveis na África Austral, é usual considerar os requisitos das normas Sul-africanas ou do catálogo de pavimentos da SATCC (CSIR, 1998).

Em Portugal adota-se um método de dimensionamento racional de base empírico-mecanicista, e deste modo surgiu a necessidade de validar os métodos mais simplistas fundamentados em catálogos que por vezes são baseados em modelos puramente empíricos, que não têm em consideração o correto desempenho dos materiais do pavimento, do solo de fundação, das condições de tráfego e das condições climáticas da região em que se enquadram as estradas em estudo.

Considerou-se então existir a necessidade de realizar uma análise comparativa entre o método de dimensionamento usualmente adotado em Portugal e o método de dimensionamento referido nas normas Sul-africanas, SAPEM (SANRAL, 2014), abordando-se ainda alguns tópicos que podem servir de referência para futuros desenvolvimentos no âmbito do projeto de pavimentos.

1.2 Objetivos do trabalho

Com este trabalho, pretende-se realizar uma análise comparativa entre diversos métodos de dimensionamento de pavimentos rodoviários, nomeadamente entre os modelos empírico-mecanicistas usualmente adotados em Portugal e na África do Sul, em particular no que se refere a propriedades dos materiais, critérios de dimensionamento e caracterização do tráfego.

É ainda abordado o manual de pavimentos SATCC (CSIR, 1998) e o respetivo catálogo de pavimentos, procurando identificar a sua adequação aos modelos mecanicistas considerados. Deste modo, pretende-se demonstrar a importância de aplicação de métodos de base empírico-

mecanicista no desenvolvimento de soluções de pavimentos mais económicas e de maior vida útil para um horizonte de projeto.

Esta dissertação pretende contribuir para um conhecimento mais aprofundado relativamente às normas de dimensionamento empírico-mecanicista vigentes na África do Sul, sendo realizada uma análise comparativa com a metodologia de dimensionamento usualmente adotada em Portugal. Estas normas, dado o seu enquadramento regional, poderão futuramente ser as normas de referência para o dimensionamento de pavimentos nos países pertencentes à SADC.

1.3 Estrutura da dissertação

A presente dissertação encontra-se organizada em seis capítulos, incluindo este primeiro capítulo, no qual são feitas algumas considerações gerais relativas ao tema.

No segundo capítulo, é elaborada uma descrição detalhada da metodologia de dimensionamento de pavimentos rodoviários geralmente adotada em Portugal, abordando-se a influência da consideração do espectro de tráfego, a influência da consideração de um valor de temperatura mensal relativamente à abordagem com base num valor de temperatura anual e a influência da metodologia de cálculo do módulo de deformabilidade de misturas betuminosas.

O terceiro capítulo incide sobre o manual de dimensionamento de pavimentos rodoviários em vigor na África do Sul, comparando-o de forma sistemática com a metodologia de dimensionamento de pavimentos flexíveis tradicionalmente adotada em Portugal. Apresentam-se algumas aplicações e casos de estudo para estruturas de pavimento flexível, onde se comparam as duas metodologias.

No quarto capítulo é descrito o manual de dimensionamento da SATCC (CSIR, 1998), definindo-se a metodologia de dimensionamento e os pressupostos necessários para se proceder à escolha da estrutura de pavimento adequada.

O quinto capítulo consiste numa análise comparativa entre a metodologia empírico-mecanicista Sul-africana e a metodologia usualmente adotada em Portugal, realizando-se igualmente uma análise sistemática das estruturas de catálogo do manual SATCC (CSIR, 1998) para um dado grupo de classes de solos de fundação e de tráfego. É feita uma análise crítica entre as duas abordagens empírico-mecanicistas e uma comparação dos resultados obtidos nas verificações realizadas.

No sexto capítulo são expostas as principais conclusões obtidas neste trabalho, sendo também sugeridas algumas propostas para desenvolvimentos futuros.

2 Dimensionamento de pavimentos rodoviários: Experiência Portuguesa

2.1 Considerações gerais

O dimensionamento de pavimentos rodoviários pode ser realizado por via empírica, AASHTO (1993), através de catálogos, RN31 (1993), JAE (1995), TRH4 (1996), SATCC (CSIR, 1998), ou por via racional, seguindo um modelo empírico-mecanicista, Claessen et al. (1977), Shell (1978), LCPC/SETRA (1994), AASHTO (2008) e SAPEM (SANRAL, 2014).

Em Portugal o dimensionamento de pavimentos (flexíveis e semi-rígidos) para a rede rodoviária nacional é normalmente realizado com base em modelos do tipo empírico-mecanicista (Figura 2.1), adotando-se em regra uma metodologia de dimensionamento muito próxima daquela proposta pela Shell, Shell (1978).

A metodologia de dimensionamento adotada em regra em Portugal obedece também a algumas diretivas incluídas no manual de conceção de pavimentos para a rede rodoviária nacional, JAE (1995), nomeadamente na definição do período de dimensionamento, na definição do tráfego de dimensionamento e na definição das características a adotar para o solo de fundação em pavimentos novos. Tal como indicado em JAE (1995), o catálogo de estruturas proposto pode ser aplicado em fase de pré-dimensionamento, devendo as estruturas de pavimento previamente obtidas ser retificadas e reajustadas por via empírico-mecanicista, em fase de projeto de execução.

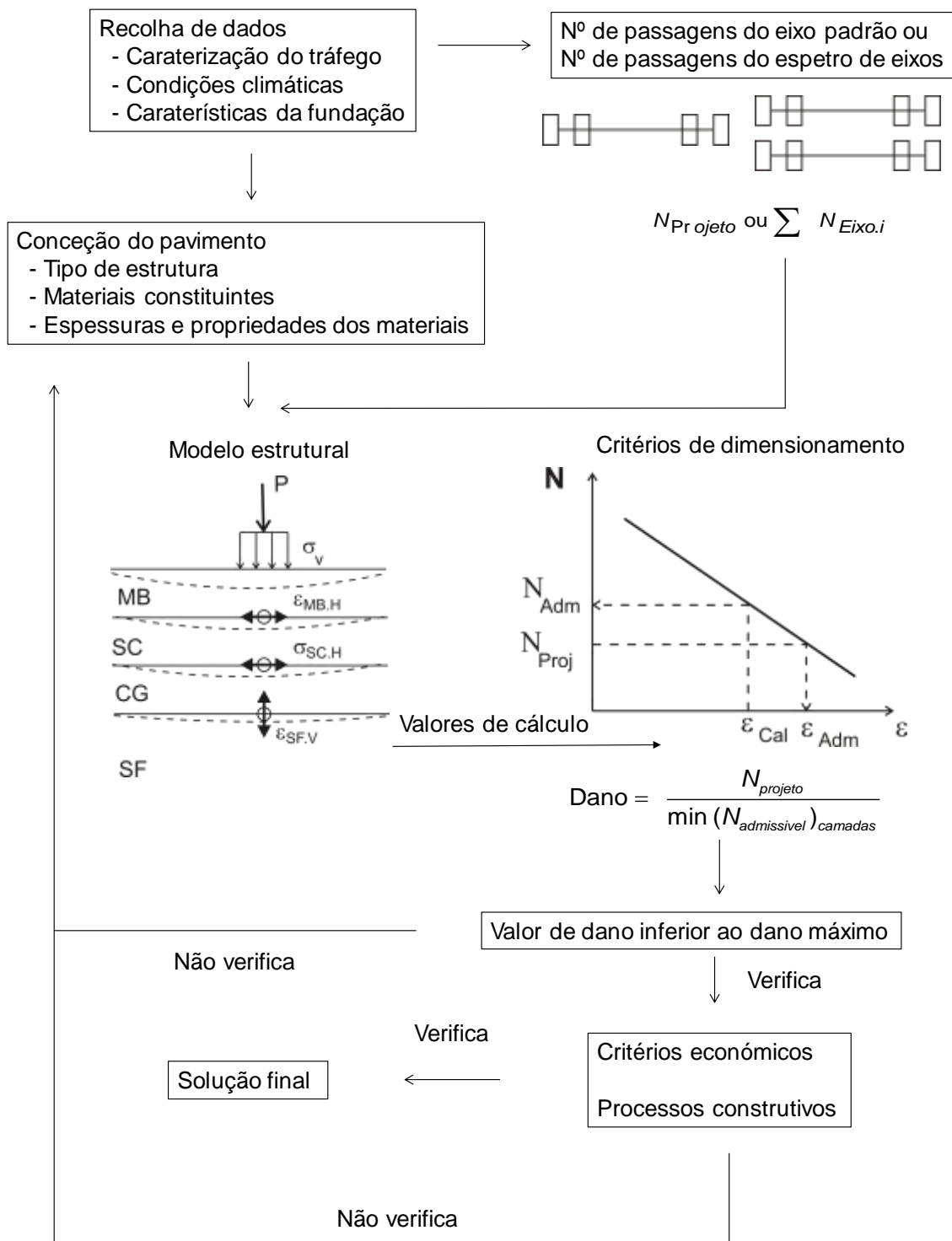


Figura 2.1 – Dimensionamento de pavimentos rodoviários (flexíveis e semi-rígidos) por via empírica-mecanicista, adaptado de Azevedo (1993).

2.2 Período de dimensionamento

O período de dimensionamento corresponde ao período de tempo em que se pretende assegurar condições adequadas de circulação (segurança, economia e conforto) aos utentes, minimizando a necessidade de obras de conservação. No dimensionamento de pavimentos rodoviários novos (flexíveis e semi-rígidos) considera-se usualmente um período de dimensionamento de 20 anos, JAE (1995).

Para classes de tráfego com menor expressão, o manual da JAE (1995) prevê que o período de dimensionamento pode eventualmente ser reduzido para um valor entre 10 a 15 anos, indicando que para estas classes poderá haver interesse económico em ser adotada uma construção faseada, ajustada à evolução do tráfego e/ou condições de serviço.

Mais recentemente, em projetos de reabilitação realizados para a IP, SA, é usual adotar um período de dimensionamento de 10 anos.

2.3 Tráfego

2.3.1 Caracterização do tráfego

O dimensionamento dos pavimentos rodoviários é normalmente realizado tendo apenas em consideração o efeito do tráfego de veículos pesados, admitindo-se que o efeito dos veículos ligeiros sobre o pavimento é desprezável face ao efeito dos veículos pesados. De acordo com o estipulado em JAE (1995) considera-se que um veículo pesado apresenta um peso bruto superior a 3.0 ton.

Na Tabela 2.1 apresenta-se a descrição dos veículos pesados tal como adotado no manual da JAE (1995), ver Brás (2012).

Tabela 2.1 – Classificação de veículos automóveis pesados de acordo com JAE (1995), adaptado de Brás (2012)

Veículos Pesados (Classes f, g, h, i, j, k)	
Categoria	Descrição
f	Camiões com mais de 3 ton sem reboque
g	Camiões com um ou mais reboque
	Tratores com semireboque
h	Tratores com semireboque e um ou mais reboques
	Tratores com um ou mais reboques
i	Autocarros e trolleybus
j	Tratores agrícolas
k	Tratores sem reboque ou semireboque e veículos especiais (cilindros bulldozer)

Em Portugal, o tráfego de veículos pesados para efeitos de dimensionamento de pavimentos rodoviários tem por base o estipulado em JAE (1995), dependendo dos seguintes parâmetros:

- O tráfego médio diário anual de veículos pesados no ano de abertura, por sentido e na via mais solicitada ($TMDA_p$);
- O período de dimensionamento de 20 anos;
- A taxa média de crescimento anual de veículos pesados no período de dimensionamento;

Em estradas com duas ou mais vias, a via mais solicitada corresponde, regra geral, à via mais à direita num dado sentido. Em função do número de vias por sentido, o manual da JAE (1995) considera a repartição do tráfego pesado na via mais solicitada, como se indica na Tabela 2.2. Assim, para uma estrada com duas vias por sentido, o $TMDA_p$ corresponde a 90% do tráfego total de veículos pesados por sentido e para uma estrada com três ou mais vias por sentido, o $TMDA_p$ corresponde a 80% do tráfego total de veículos pesados por sentido.

Tabela 2.2 – Distribuição do tráfego pesado na via mais solicitada JAE (1995)

Nº de vias	Via mais solicitada (%)
2	90
3 ou mais	80

Em JAE (1995) são consideradas oito classes de tráfego definidas em função do valor de $TMDA_p$. A escolha dessas classes baseou-se numa análise estatística do tráfego da rede viária nacional e teve em conta os intervalos adotados noutros países, ver Tabela 2.3. Nas situações em que não se dispõe de estudo específico, poderão adotar-se as taxas de crescimento anual do tráfego pesado indicadas na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Classes de tráfego preconizadas em JAE (1995), incluindo taxas de crescimento

Classe de tráfego	$TMDA_p$	Taxa média de crescimento anual (%)
T_7	< 50	Estudo específico
T_6	50 - 150	3
T_5	150 - 300	
T_4	300 - 500	
T_3	500 - 800	4
T_2	800 - 1200	
T_1	1200 - 2000	
T_0	> 2000	Estudo específico

2.3.2 Eixo-padrão equivalente (fator de agressividade)

Como indicado na Tabela 2.3, o espetro de veículos pesados a circular nas estradas nacionais é variado, tanto em termos de peso máximo como do tipo e número de eixos e do tipo de rodados. No dimensionamento de pavimentos rodoviários em Portugal, é usual quantificar as ações

devidas ao tráfego durante o período de vida útil com base no número de passagens de um único eixo-padrão, de eixo simples e de rodado duplo.

Em JAE (1995) é indicado o eixo padrão de 80 kN para dimensionamento de pavimentos flexíveis e o eixo padrão de 130 kN para dimensionamento de pavimentos semi-rígidos, ver Tabela 2.4. Contudo, é habitual adotar-se o eixo padrão de 130 kN para o dimensionamento de pavimentos da rede viária nacional, independentemente do tipo de solução estrutural adotada.

Tabela 2.4 – Eixos padrão adotados no dimensionamento de pavimentos rodoviários em Portugal

Eixo Padrão	R (m)	DR (m)	p (MPa)	Configuração (Planta)
80 kN (Shell, 1978)	0,105	0,315	0,60	
130 kN (INIR, 2012)	0,1225	0,35	0,69	

Caso a distribuição do espectro das cargas dos veículos pesados seja conhecida de forma rigorosa, é possível definir o número de passagens do eixo padrão equivalente adotado ($N_{Projeto}$), com base nas cargas por eixo e no número de passagens de veículos pesados, AASHTO (1993):

$$N_{Projeto} = N_{Eixo} \times \left(\frac{P_{Eixo}}{P_{Projeto}} \right)^{\beta} \quad (2.1)$$

em que, N_{Eixo} e P_{Eixo} são respetivamente o número de passagens e a carga por eixo de um eixo simples, e $N_{Projeto}$ é o número de passagens do eixo padrão equivalente a uma carga por eixo igual a $P_{Projeto}$. O expoente β toma usualmente o valor de 4 para pavimentos flexíveis e no caso de pavimentos semi-rígidos e rígidos toma valores entre 11 e 35, Branco et al. (2008).

Os eixos de um dado veículo pesado (Tabela 2.4) devem ser primeiramente transformados em eixos simples antes da aplicação da equação 2.1. É usual considerar-se que uma passagem de um eixo tandem de peso P corresponde a 1,4 passagens de um eixo simples de peso $P/2$ e que a passagem de um eixo triplo de peso P corresponde a 2,3 passagens de um eixo simples de peso $P/3$, Branco et al. (2008).

Em Lima et al. (1999) indica-se, com base no espectro de veículos pesados a circular em Portugal, que se deve adotar uma transformação direta de eixos duplos e triplos em eixos simples. Assim, uma passagem de um eixo duplo é equivalente a duas passagens de um eixo simples de peso $P/2$. De uma forma geral, pode adotar-se a seguinte expressão para equivalência entre eixos de veículos pesados e eixos padrão de projeto:

$$N_{Projeto} = N_{Eixo} \times \left(k \frac{P_{Eixo}}{P_{Projeto}} \right)^{\beta} \quad (2.2)$$

Em que β e k tomam os valores indicados na Tabela 2.7, em função do tipo de solução estrutural considerada. O fator de agressividade (FA) de um dado eixo é dado por:

$$FA_{\text{eixo}} = \frac{N_{\text{Projeto}}}{N_{\text{Eixo}}} \quad (2.3)$$

O fator de agressividade de um dado veículo pesado é dado pela soma dos fatores de agressividade de cada eixo que o compõem. Como, em geral, não é possível definir com rigor o espectro das cargas dos veículos pesados a circular, o fator de agressividade médio representativo do espectro de veículos pesados é definido com base nos valores indicados em JAE (1995) em função da classe de tráfego, JAE (1995), Tabela 2.5.

Tabela 2.5 – Fatores de agressividade de tráfego para eixos padrão de 80 kN e de 130 kN a adotar no dimensionamento de pavimentos rodoviários, JAE (1995)

Classe de tráfego	TMDA _p	Pavimentos flexíveis		Pavimentos semi-rígidos	
		Fator de agressividade (FA)	N _{80kN (20 anos)}	Fator de agressividade (FA)	N _{130kN (anos)}
T ₇	< 50	Estudo específico			
T ₆	50 - 150	2	2x10 ⁶	0,5	5x10 ⁵
T ₅	150 - 300	3	8x10 ⁶	0,6	2x10 ⁶
T ₄	300 - 500	4	2x10 ⁷	0,7	4x10 ⁶
T ₃	500 - 800	4,5	4x10 ⁷	0,8	7x10 ⁶
T ₂	800 - 1200	5	7x10 ⁷	0,9	1x10 ⁷
T ₁	1200 - 2000	5,5	1x10 ⁸	1	2x10 ⁷
T ₀	> 2000	Estudo específico			

Conhecendo o fator de agressividade em função da classe de tráfego, o número de eixos padrão acumulado no período de dimensionamento adotado para o pavimento é dado por:

$$N_{\text{Projeto}} = 365 \times TMDA_p \times C \times FA \times p \quad (2.4)$$

Em que N_{Projeto} é o número acumulado de passagens de eixos padrão, $TMDA_p$ é o tráfego médio diário anual de pesados no ano de abertura por sentido e na via mais solicitada, FA é o fator de agressividade do tráfego pesado, p é o período de dimensionamento (em geral 20 anos) e C é o fator de crescimento de tráfego, o qual tem em conta o período de dimensionamento (p) e a taxa média de crescimento anual do tráfego pesado, t (Tabela 2.3), sendo dado por:

$$C = \frac{(1+t)^p - 1}{p \times t} \quad (2.5)$$

Na Tabela 2.5 encontram-se definidos os valores acumulados de eixos padrão tidos como referência na elaboração do catálogo de pavimentos da JAE (1995). Atualmente, em especial em projetos de reabilitações, os estudos de tráfego especificam a taxa de crescimento a adotar, que em regra é inferior à proposta em JAE (1995) para pavimentos novos. A determinação do fator de agressividade continua a ser definida de acordo com a metodologia indicada acima.

Tabela 2.6 – Tipologia de eixos de veículos pesados

Tipologia do eixo	Descrição	Configuração (Planta)
Simples	Eixo com um rodado em cada extremidade (simples ou duplo)	
Duplo ou tandem	Dois eixos com dois rodados (simples ou duplo) próximos, um atrás do outro. Possíveis combinações rodado simples com duplo.	
Triplo ou tridem	Três eixos com três rodados (simples ou duplo) próximos, um atrás do outro. Possíveis combinações rodado simples com duplo	

Tabela 2.7 – Valores de β e k para conversão de eixos

Tipo de pavimento	Carga Eixo Padrão (kN)	β	k , Branco et al. (2008)			k , Lima et al. (1999)		
			s	t	tr	s	t	tr
Flexível	80	4	1,0	0,544	0,410	1,0	0,595	0,439
Semi-rígido	130	11	1,0	0,516	0,360	1,0	0,533	0,368
		33	1,0	0,505	0,342	1,0	0,511	0,345

s – eixo simples
 t – eixo duplo ou tandem
 tr – eixo triplo ou tridem

2.3.3 Espectro de tráfego

Em métodos de dimensionamento recentes baseados em modelos do tipo empírico-mecanicista, AASHTO (2008), MnPave (2008), Simões et al. (2013), admite-se que o espectro de tráfego pode ser tido diretamente em conta no dimensionamento de pavimentos. O efeito de cada eixo (carga

e disposição dos rodados), em especial sobre estruturas de pavimento menos tradicionais que podem resultar de reabilitações, não tem de ser obrigatoriamente determinado com base no eixo equivalente seguindo a metodologia definida no ponto 2.3.2.

Um possível espectro de cargas por eixo de veículos pesados é o definido por Sousa-Melo (1993), ver Brás (2012), Tabela 2.8. Na Tabela 2.9 apresenta-se a distribuição percentual do tráfego pesado por categoria de veículos, de acordo com Sousa-Melo (1993) e Brás (2012). Verifica-se que os veículos pesados da classe f1 constituem, em média, a maioria dos pesados em circulação.

Na Tabela 2.10 apresenta-se a repartição dos tipos de veículos pesados pelos três níveis de carga por eixo, carga típica, carga próxima do limite legal e carga máxima, identificados em Sousa-Melo (1993) como representativos do espectro de veículos pesados a circular na rede de estradas nacional.

O espectro de tráfego unitário a adotar no projeto de pavimentos rodoviários é o definido na Tabela 2.11, onde estão indicados para cada eixo os valores de passagem de eixo, para um valor unitário de veículos pesados. Os valores de passagens de eixo a adotar no dimensionamento de pavimentos têm de ser multiplicados pelo somatório do tráfego total de veículos pesados no período de dimensionamento. Indica-se igualmente o espectro unitário para os três níveis de carga por eixo adotados em Sousa-Melo (1993). Deste modo, poderão ser adotados valores de distribuição de tráfego diferentes dos indicados na Tabela 2.10.

Na Tabela 2.12 apresenta-se o número de passagens de eixos padrão equivalentes definidos com base na metodologia da JAE (1995), que adota fatores de agressividade médios, e o número de passagens de eixo padrão equivalente definidas com base no espectro de tráfego indicado na Tabela 2.11 e convertendo-o para o eixo padrão equivalente com base na metodologia apresentada em 2.3.2. Da análise da Tabela 2.12 verifica-se que o espectro de tráfego indicado em Sousa-Melo (1993) para pavimentos flexíveis, apresenta um número de passagens de eixo equivalente próximo do indicado em JAE (1995) para uma classe de tráfego T5.

Para classes de tráfego superiores, o espectro de tráfego proposto em Sousa-Melo (1993) prevê valores de número de passagens de eixo padrão equivalentes inferiores aos obtidos com base na metodologia indicada em JAE (1985). Para pavimentos semi-rígidos verifica-se ainda que se obtêm resultados próximos entre o espectro de tráfego adotado e o indicado em JAE (1995) caso se adote um expoente de 11. Verifica-se ainda que, se na conversão de eixos (equação 2.2) for adotado um expoente de 33, os números de eixos padrão equivalente indicados em JAE (1985) são muito inferiores aos obtidos com base num dado espectro.

Tabela 2.8 – Espectro de cargas por eixos, Sousa-Melo (1993) e Brás (2012)

a) Carga típica

V. pesado (Categoria)	Carga total (ton)	Carga por eixo							
		tipo	carga (ton)	tipo	carga (ton)	tipo	carga (ton)	tipo	carga (ton)
f1	14	s	4	s	10	-	-	-	-
f2	16	s	4	t	16	-	-	-	-
g1	30	s	4	s	10	s	8	s	8
g2	30	s	4	s	10	s	6	t	10
g3	36	s	4	t	14	s	9	s	9
h2	30	s	4	s	9	t	17	-	-
h3	30	s	4	s	8	tr	18	-	-
h5	36	s	4	t	16	t	16	-	-
i1	14	s	5	s	9	-	-	-	-

b) Carga próxima do limite legal

V. pesado (Categoria)	Carga total (ton)	Carga por eixo							
		tipo	carga (ton)	tipo	carga (ton)	tipo	carga (ton)	tipo	carga (ton)
f1	16	s	4	s	12	-	-	-	-
f2	24	s	4	t	20	-	-	-	-
g1	54	s	6	s	16	s	16	s	16
g2	40	s	4	s	12	s	12	t	12
g3	48	s	4	t	20	s	12	s	12
h2	34	s	4	s	10	t	20	-	-
h3	38	s	4	s	8	tr	18	-	-
h5	45	s	5	t	20	t	20	-	-
i1	17	s	5	s	12	-	-	-	-

c) Carga máxima

V. pesado (Categoria)	Carga total (ton)	Carga por eixo							
		tipo	carga (ton)	tipo	carga (ton)	tipo	carga (ton)	tipo	carga (ton)
f1	22	s	6	s	16	-	-	-	-
f2	36	s	6	t	30	-	-	-	-
g1	54	s	6	s	16	s	16	s	16
g2	54	s	6	s	16	s	16	t	16
g3	66	s	6	t	28	s	16	s	16
h2	56	s	6	s	16	t	38	-	-
h3	60	s	6	s	16	tr	38	-	-
h5	66	s	6	t	29	t	31	-	-
i1	-	-	-	-	-	-	-	-	-

s – eixo simples

t – eixo duplo ou tandem

tr – eixo triplo ou tridem

Tabela 2.9 – Distribuição média do espectro de veículos pesados em função da categoria, Sousa-Melo (1993) e Brás (2012)

V. pesado (Categoria)	Distribuição média (%)
f1	54
f2	20
g1	2
g2	2
g3	1
h2	6
h3	5
h5	4
i1	6

Tabela 2.10 – Distribuição percentual do tráfego pesado por nível de carga, Sousa-Melo (1993) e Brás (2012)

V. pesado (Categoria)	Carga por eixo (%)		
	Carga típica	Próximo do limite legal	Carga máxima
f1	90	9,5	0,5
f2	85	14	1
g1	80	18	2
g2	80	18	2
g3	80	18	2
h2	75	22	3
h3	70	26	4
h5	65	30	5
i1	95	5	-

Tabela 2.11 – Espectro de cargas por eixos para um valor unitário de veículos pesados no período de dimensionamento

N eixo/Número de veículos pesados				Eixo	
C. Típica	C. Limite Legal	C. Máxima	Distribuição	Tipo	Carga (ton)
0,94000	0,88000	0,00000	0,91290	s	4
0,06000	0,10000	0,06000	0,07200	s	5
0,02000	0,02000	0,94000	0,03110	s	6
0,09000	0,05000	0,00000	0,08000	s	8
0,14000	0,00000	0,00000	0,11800	s	9
0,58000	0,06000	0,00000	0,53120	s	10
0,00000	0,66000	0,06000	0,06510	s	12
0,00000	0,06000	0,77000	0,01970	s	16
0,02000	0,00000	0,00000	0,01600	t	10
0,00000	0,02000	0,00000	0,00360	t	12
0,01000	0,00000	0,00000	0,00800	t	14
0,28000	0,00000	0,02000	0,22240	t	16
0,06000	0,00000	0,00000	0,04500	t	17
0,00000	0,35000	0,00000	0,06700	t	20
0,05000	0,00000	0,01000	0,03520	t	28
0,00000	0,00000	0,04000	0,00200	t	29
0,00000	0,00000	0,20000	0,00200	t	30
0,00000	0,00000	0,04000	0,00200	t	31
0,00000	0,00000	0,06000	0,00180	t	38
0,05000	0,05000	0,00000	0,04800	tr	18
0,00000	0,00000	0,05000	0,00200	tr	38

Tabela 2.12 – Número de passagens de eixo padrão equivalente a adotar no dimensionamento de pavimentos para classes de tráfego T6 a T3 definidas em JAE (1995)

a) Eixo padrão equivalente – Fatores de agressividade médios da JAE (1995)

Classe de tráfego	TMDA _p	Pavimentos flexíveis		Pavimentos semi-rígidos
		N _{80kN} (20 anos)	N _{130kN} (20 anos)	N _{130kN} (20 anos)
T ₆	150	2,942x10 ⁶	4,220x10 ⁵	7,356x10 ⁵
T ₅	300	1,777x10 ⁷	1,688x10 ⁶	1,765x10 ⁶
T ₄	500	2,174x10 ⁷	3,117x10 ⁶	3,804x10 ⁶
T ₃	800	3,913x10 ⁷	5,611x10 ⁶	6,956x10 ⁶

b) Eixo padrão equivalente – Função do espectro de veículos pesados adotado em Brás (2012)

Classe de tráfego	TMDA _p	Pavimentos flexíveis (β=4)		Pavimentos semi-rígidos (β=11)		Pavimentos semi-rígidos (β=33)	
		N _{130kN} (20 anos): H1	N _{130kN} (20 anos): H2	N _{130kN} (20 anos): H1	N _{130kN} (20 anos): H2	N _{130kN} (20 anos): H3	N _{130kN} (20 anos): H4
T ₆	150	7,095x10 ⁵	8,204x10 ⁵	6,917x10 ⁵	8,587x10 ⁵	5,567x10 ⁸	7,890x10 ⁸
T ₅	300	1,419x10 ⁶	1,641x10 ⁶	1,383x10 ⁶	1,717x10 ⁶	1,113x10 ⁹	1,578x10 ⁹
T ₄	500	2,621x10 ⁶	3,031x10 ⁶	2,555x10 ⁶	3,172x10 ⁶	2,056x10 ⁹	2,915x10 ⁹
T ₃	800	4,194x10 ⁶	4,849x10 ⁶	4,088x10 ⁶	5,076x10 ⁶	3,290x10 ⁹	4,663x10 ⁹

H1: Conversão de eixo duplo e triplo para eixo simples conforme indicado em Branco et al. (2008)

H2: Conversão de eixo duplo e triplo para eixo simples conforme indicado em Lima et al. (1999)

2.4 Condições climáticas

O dimensionamento de pavimentos rodoviários depende de diversos fatores climáticos, nomeadamente das condições de temperatura e precipitação. A atribuição de características mecânicas aos vários materiais constituintes das camadas de um pavimento tem em conta, não só a sua composição e características definidas em caderno de encargos de projeto, mas também as condições climáticas da região em que se inserem os troços de estrada em apreço.

O novo método de dimensionamento de pavimentos rodoviários, AASHTO (2008), Simões et al. (2013), inclui um módulo de análise (EICM-Enhanced Integrated Climatic Model) que, com base em dados de temperatura, precipitação, velocidade do vento, nível de nebulosidade e radiação solar, consegue simular ao longo do tempo as condições de temperatura e de humidade nas várias camadas constituintes do pavimento.

É reconhecido que a resistência das camadas granulares e dos solos de fundação de um pavimento é inversamente proporcional ao respetivo teor em água; isto é, à medida que aumenta o teor em água diminui a resistência destas camadas. No entanto, o comportamento das camadas granulares e do solo de fundação em função do teor em água, nomeadamente o valor de módulo de deformabilidade a adotar, é difícil de caracterizar, devido à elevada quantidade de parâmetros envolvidos. Por este motivo, é aconselhável, para efeitos práticos de dimensionamento de pavimentos flexíveis e semi-rígidos, a adoção de procedimentos simples, Antunes (1993). Assim, regra geral, considera-se que as estruturas de pavimento (flexíveis, semi-rígidos) possuem um sistema de drenagem (interna e externa) eficiente que não compromete o comportamento mecânico do pavimento.

Pelos motivos anteriormente apontados, o dimensionamento de pavimentos rodoviários em Portugal tem em consideração essencialmente o efeito sazonal da temperatura e a sua influência no módulo de deformabilidade das misturas betuminosas.

2.4.1 Temperaturas de serviço em misturas betuminosas

O procedimento mais usual para se ter em conta a ação da temperatura nas misturas betuminosas para fins de dimensionamento tem por base a metodologia adotada em Shell (1978). Assim, com base no registo das normais climatológicas de uma dada região (IPMA, 2010) definem-se as temperaturas médias mensais do ar. Em seguida, estabelece-se a temperatura média anual do ar ponderada com base no fator de ponderação médio, obtido a partir do valor médio dos fatores de ponderação relativos às temperaturas médias mensais. Os fatores de ponderação são determinados através do gráfico Fator de ponderação/Temperatura do ar, proposto por Claessen et al. (1977) e esquematizado na Figura 2.2.

Na Tabela 2.13, relativa à estação climatológica de Faro, ilustra-se o cálculo da temperatura de projeto do ar, que corresponde à temperatura média ponderada anual do ar (neste caso, 19,1°C).

De acordo com a metodologia da Shell (1978), o módulo de deformabilidade das misturas betuminosas deve ser definido para um valor de temperatura de projeto obtido em função da temperatura de projeto do ar e da espessura total das misturas betuminosas, com base no gráfico proposto por Claessen et al. (1977), ver Figura 2.4.

No dimensionamento de pavimentos rodoviários em Portugal, utiliza-se de forma conservativa o gráfico indicado na Figura 2.4 para determinar a temperatura de projeto de cada camada betuminosa, adotando um valor de espessura equivalente a uma profundidade correspondente a metade da espessura da camada em apreço. Com base nesta metodologia, a camada betuminosa inferior apresenta uma temperatura de projeto próxima da que seria adotada caso se adotasse a metodologia Shell (1978) e as camadas superiores apresentam temperaturas de projeto superiores às definidas pela metodologia Shell (1978).

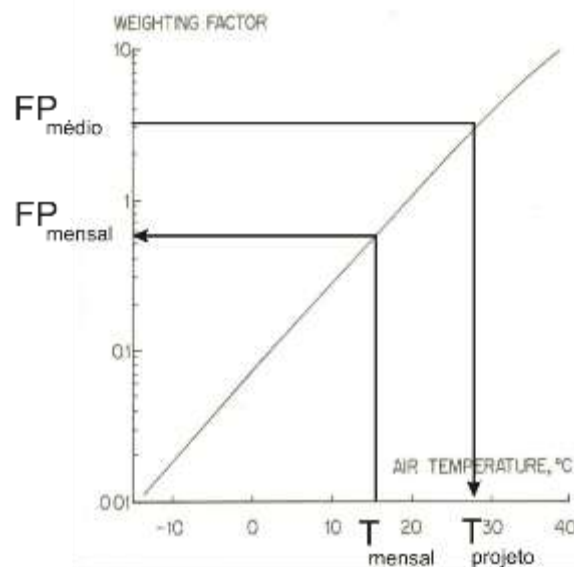


Figura 2.2 – Gráfico Fator de ponderação/Temperatura média do ar, Claessen et al. (1977)

Existem ainda metodologias que definem um valor de temperatura de serviço mensal para as camadas betuminosas. Por exemplo, Witczak (1972) propõe a seguinte expressão analítica:

$$T_{mistura}(z) = (T_{mma} + 17,778) \left(1,0 + \frac{1,0}{39,37z + 4} \right) - \left(\frac{18,889}{39,37 + 4,0} \right) - 14,444 \quad (2.6)$$

em que, T_{mma} é a temperatura média mensal do ar (°C) para um dado mês do ano, z é a profundidade a partir da superfície do pavimento (m) e $T_{mistura}(z)$ é a temperatura média mensal equivalente da mistura betuminosa à profundidade z .

O método de dimensionamento empírico-mecanicista proposto pelo departamento de transportes do estado do Minnesota, MnPave (2008), adota a equação (2.6), indicando ainda que a

temperatura equivalente mensal de cada camada deve ser definida a uma profundidade equivalente ao seu primeiro terço.

A Figura 2.5 apresenta, para vários valores de temperatura do ar, a evolução da temperatura nas misturas betuminosas até uma profundidade de 0,50 m. Verifica-se que, à medida que se aumenta a temperatura do ar, aumenta a diferença de temperatura nas misturas betuminosas, obtida com as duas metodologias (Shell e Witczak), sendo que com a metodologia Shell (1978) se obtêm sempre temperaturas de serviço superiores no interior das misturas betuminosas. Verifica-se igualmente que a diferença entre as duas metodologias diminui em profundidade e que a equação proposta por Witczak (1972) apresenta menores gradientes em profundidade.

Tabela 2.13 – Cálculo da temperatura de projeto para a estação climatológica de Faro - normais climatológicas 1981-2010, IPMA (2010)

Mês	Temperatura média mensal do ar (°C)	Fatores de ponderação
Janeiro	12,0	0,358
Fevereiro	12,8	0,399
Março	14,8	0,517
Abril	16,1	0,617
Maio	18,4	0,835
Junho	21,9	1,333
Julho	24,2	1,793
Agosto	24,1	1,769
Setembro	22,3	1,408
Outubro	19,3	0,941
Novembro	15,7	0,585
Dezembro	13,3	0,426
Temperatura média anual do ar (°C)		17,9
Fator de ponderação médio		0,915
Temperatura média anual do ar ponderada (°C)		19,1

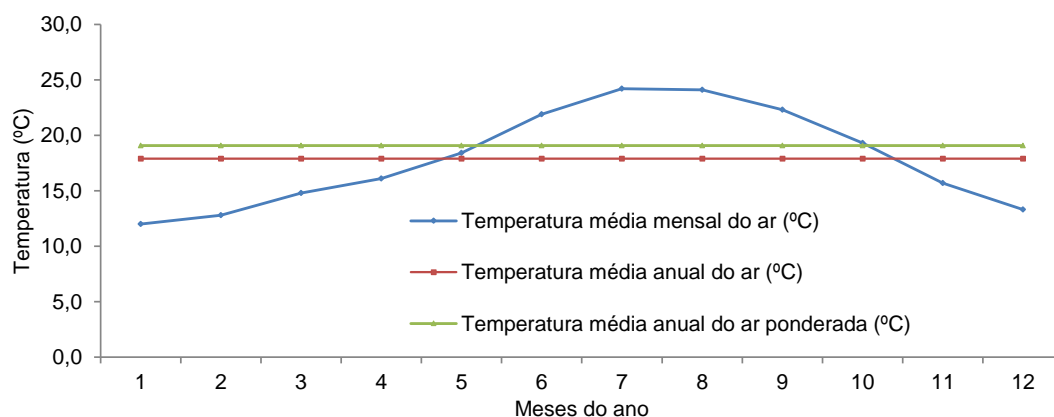


Figura 2.3 – Temperatura de projeto para a estação climatológica de Faro

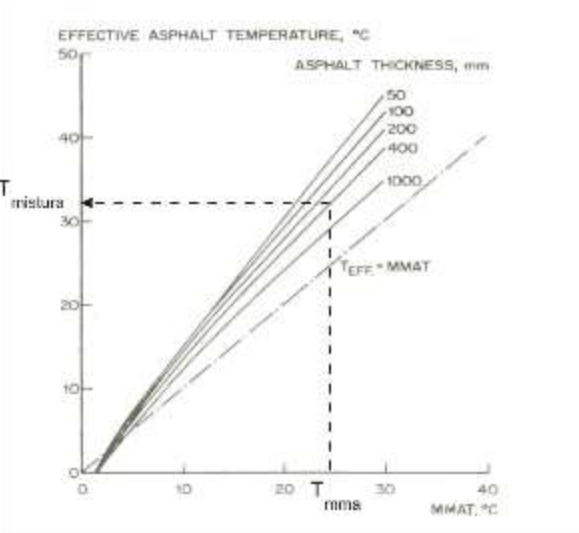


Figura 2.4 – Temperatura de projeto de camadas betuminosas, Claessen et al. (1977)

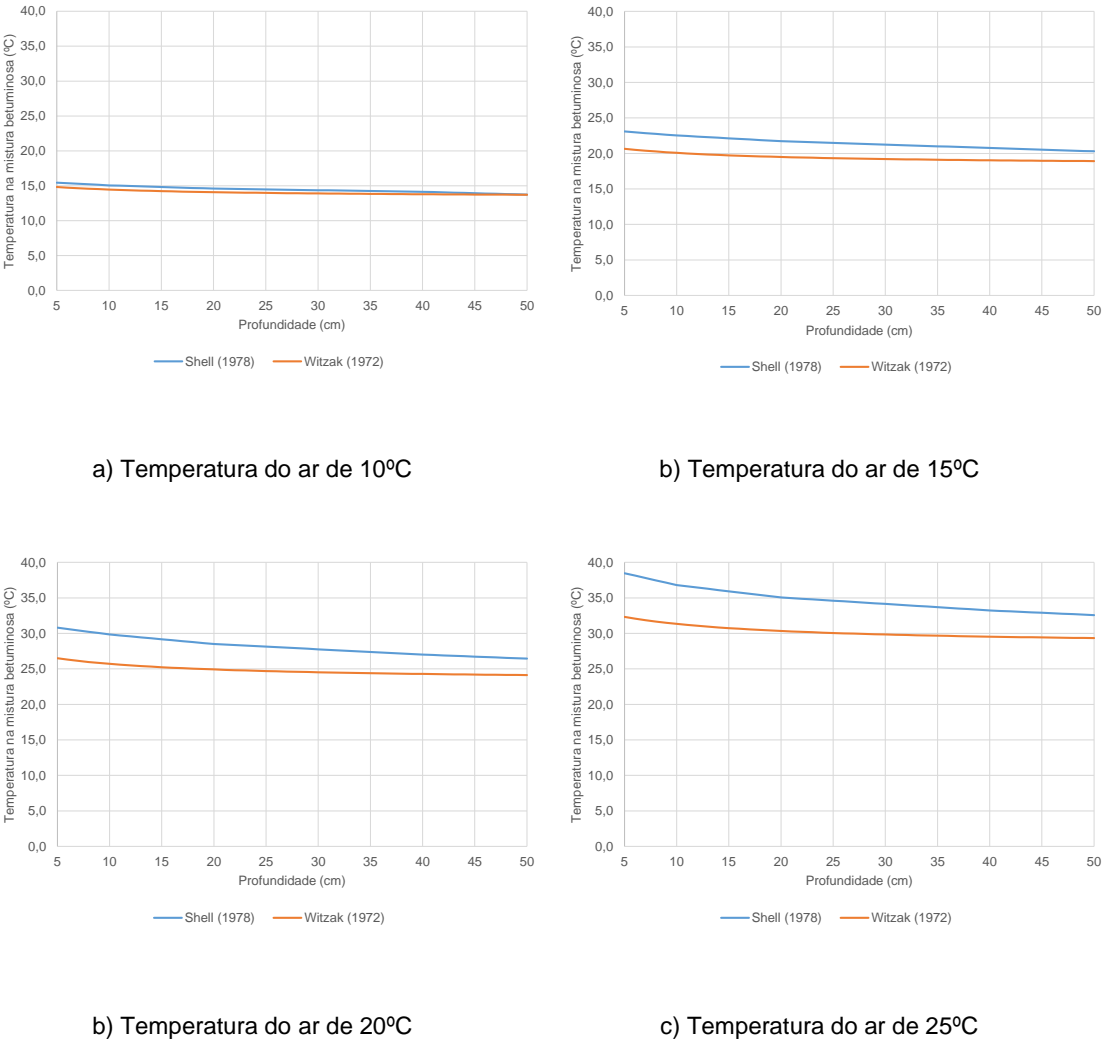


Figura 2.5 – Temperatura de projeto das camadas betuminosas em função da profundidade para vários valores da temperatura do ar

O manual de dimensionamento da JAE (1995) divide Portugal Continental em três zonas (zona temperada, zona média e zona quente), em função das temperaturas máximas que ocorrem no período estival. Em JAE (1995) é igualmente indicado a classe do betume a empregar nas misturas betuminosas a quente, em camada de base e ligação, em função da zona térmica e da classe do tráfego. Atualmente é adotado preferencialmente um betume da classe 35/50 para camadas de base e ligação em zona térmica média e quente, independentemente da classe de tráfego, escolhendo-se um betume da classe 60/70 em zona temperada. Para a camada de desgaste, adotam-se geralmente misturas betuminosas com betumes modificados com polímeros ou com incorporação de borracha.

2.5 Condições de fundação

Tal como indicado em JAE (1995), considera-se como fundação do pavimento, para além da camada do leito do pavimento, os solos subjacentes que condicionam o seu comportamento. Indica-se em JAE (1995) que, para efeito de dimensionamento de pavimentos rodoviários, se devem analisar as características dos solos até uma profundidade de 1,0 m. A superfície da camada de leito de pavimento constitui a plataforma de apoio sobre a qual assenta a estrutura do pavimento.

A fundação do pavimento deve ter uma estrutura tal que permita, Branco et al. (2008):

- Assegurar, a curto prazo, uma superfície regular com capacidade de suporte que permita a construção da primeira camada do pavimento com as características geométricas e de compactação pretendidas;
- Garantir, a longo prazo, a capacidade de suporte necessária para o bom funcionamento estrutural do pavimento;
- Viabilizar, sem degradação, a drenagem das águas pluviais e a circulação do equipamento de obra sem prejuízo durante a fase de construção.

O módulo de deformabilidade de um solo depende de vários fatores, tais como o tipo de solo, o estado de compactidade, o teor em água e o estado de tensão, Antunes (1993). O módulo de deformabilidade de solos finos com estado de tensão triaxial é do tipo:

$$E_s = f(\sigma_1 - \sigma_3) = f(\sigma_d) \quad (2.7)$$

Em que σ_1 e σ_3 são as tensões principais I e III e σ_d é a correspondente tensão deviatórica. Em geral o módulo de deformabilidade é decrescente com tensão deviatórica crescente. Dado a deformabilidade dos solos depender de um grande número de fatores e o recurso a ensaios triaxiais nem sempre ser possível (por restrições económicas e de planeamento temporal dos trabalhos em obra), recorre-se em geral a métodos expeditos baseados em relações empíricas para estimar módulos de deformabilidade a partir de propriedades mais fáceis de determinar, por exemplo a classificação do solo ou o seu valor de CBR.

Em Claessen et al. (1977) é proposto que o módulo de deformabilidade (MPa) seja estimado a partir do CBR (%), com base em:

$$E_s = 10 \text{ CBR} \quad (2.8)$$

A equação anterior é tradicionalmente adotada em projetos de dimensionamento rodoviários em Portugal para valores de CBR inferiores a 10%. Para valores de CBR entre 2% e 12% é igualmente possível definir o módulo de deformabilidade a partir da equação proposta por Powell et al. (1984):

$$E_s = 17,6 \text{ CBR}^{0,64} \quad (2.9)$$

A equação proposta por Powell et al. (1984) é mais conservativa para valores de CBR superiores a 5% e para valores inferiores a 5% prevê valores de módulo de deformabilidade mais elevados que os definidos pela fórmula proposta por Claessen et al. (1977).

Em JAE (1995) são indicadas quatro classes de fundação, com diferentes valores de cálculo do módulo de deformabilidade, Tabela 2.14. Tal como indicado, em classes de tráfego com maior exigência, há igualmente maior exigência sobre a qualidade da fundação. Como referido em JAE (1995), as classes foram estabelecidas tendo em conta os solos usualmente encontrados e os valores de CBR dos mesmos para as condições mais desfavoráveis previsíveis em obra e após a entrada em serviço.

Na Tabela 2.15 são indicadas as classes de solos adotadas (S0 a S5), bem como a gama de valores de CBR associados a cada uma delas. Em JAE (1995) identifica-se de forma mais exaustiva os possíveis tipos de solos associados a cada uma das classes, adotando-se para tal a Classificação Unificada de Solos.

O valor típico para o coeficiente de Poisson de solos é de 0,40, podendo adotar-se uma gama de valores entre 0,30 a 0,50. Em solos coesivos adotam-se valores mais altos e em solos não coesivos podem adotar-se valores mais baixos, Antunes (1993).

Em projeto de pavimentos é usual construir na zona superior da terraplanagem uma camada de leito de pavimento cujas propriedades dependem do solo onde é executada, das características dos solos a adotar e da classe de plataforma pretendida, como especificado nas Tabelas 2.15 e 2.16.

Tabela 2.14 – Classes de fundação definidas em JAE (1995)

Classe de Fundação	Módulo da Fundação (MPa)		Classe de Tráfego
	Gama	Cálculo	
F ₁	> 30 a ≤ 50	30	T ₅ , T ₆
F ₂	> 50 a ≤ 80	60	T ₃ , T ₄ , T ₅ , T ₆
F ₃	> 80 a ≤ 150	100	T ₁ , T ₂ , T ₃ , T ₄ , T ₅ , T ₆
F ₄	> 80 a ≤ 150	150	T ₁ , T ₂ , T ₃ , T ₄ , T ₅ , T ₆

Tabela 2.15 – Camadas de leito em materiais não ligados, JAE (1995)

Solo		Classe da Fundação			
		F ₁	F ₂	F ₃	F ₄
Classe	E (Mpa) CBR (%)	> 30 a ≤ 50	> 50 a ≤ 80	> 80 a ≤ 150	> 80 a ≤ 150
S ₀	< 3	estudo especial			
S ₁	≥ 3 a < 5	0,30 S ₂ ou 0,20 S ₃	0,60 S ₃ ou 0,40 S ₄	-	(2)
S ₂	≥ 5 a < 10	(1)	0,30 S ₃ ou 0,15 S ₄	0,60 S ₃ ou 0,30 S ₄	
S ₃	≥ 10 a < 20	-	(1)	0,20 S ₄	
S ₄	≥ 20	-	-	(1)	
S ₅	≥ 40	-	-	(1)	

espessuras estão definidas em m

(1) Em escavação deve ser escarificado e recompactado na profundidade necessária à garantia de uma espessura final de 0,30 m bem compactada; em aterro as condições de fundação estão garantidas

(2) Em pedraplenos ou em aterros com materiais do tipo solo-enrocamento, com uma camada de leito de pavimento em material pétreo de espessura não inferior a 0,15 m

Nota: Em escavação em rocha, e tendo em vista a fundação do tipo F₄, é necessário realizar uma regularização em material pétreo devidamente compactado com cilindros de pneus e colocar uma camada do mesmo tipo de material com a espessura mínima de 0,15 m

Tabela 2.16 – Camadas de leito em materiais tratados com ligantes hidráulicos, JAE (1995)

Solo				
		F ₂	F ₃	F ₄
Classe	E (Mpa) CBR (%)	> 50 a ≤ 80	> 80 a ≤ 150	> 80 a ≤ 150
S ₀	< 3	estudo especial		
S ₁	≥ 3 a < 5	0,40 ST ₁ ou 0,25 ST ₂	0,40ST ₂	
S ₂	≥ 5 a < 10	-	0,40 ST ₁ ou 0,25 ST ₂	0,40 ST ₂
S ₃	≥ 10 a < 20	-	-	0,25 ST ₂
S ₄	≥ 20	-	-	
S ₅	≥ 40	-	-	

espessuras estão definidas em m

ST₁ - Solo tratado com cal, CBR imediato > 8%

ST₂ - Solo tratado com cimento, CBR imediato > 15% e resistência à compressão diametral aos 28 dias > 0,2 MPa

2.6 Materiais de pavimentação

2.6.1 Misturas betuminosas fabricadas a quente

As misturas betuminosas são constituídas por um conjunto de materiais granulares doseados e misturados em central com uma quantidade de ligante betuminoso previamente determinada. As misturas betuminosas fabricadas a quente em central podem ser aplicadas em camadas com características de desgaste, regularização, ligação ou base.

O comportamento das misturas betuminosas depende da temperatura a que estas se encontram, do tempo de carregamento e da sua própria composição, Branco et al (2008). Para temperaturas muito elevadas, os betumes podem apresentar comportamentos viscoelásticos ou mesmo viscosos, afetando o desempenho das misturas. A determinação do módulo de deformabilidade é usualmente realizada recorrendo a ensaios de carga cíclicos, com uma dada amplitude (σ_0), frequência (ω) e temperatura. A tensão aplicada é dada por:

$$\sigma(t) = \sigma_0 \sin(\omega t) \quad (2.10)$$

A resposta da mistura betuminosa, em termos de extensões, é medida experimentalmente, sendo dada por:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \sin(\omega t - \phi) \quad (2.11)$$

Em que ϕ é o ângulo de fase e ε_0 é a amplitude de extensão. Se o ângulo de fase é próximo de zero a resposta é próxima da elástica; se o ângulo de fase for próximo de 90° a resposta é puramente viscosa. Com base nos ensaios pode definir-se um módulo complexo ($E^*(\phi)$) dado por:

$$E^*(\phi) = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} (\cos \phi + i \sin \phi) \quad (2.12)$$

Da expressão anterior pode concluir-se que o módulo de deformabilidade da mistura $E_{mistura} = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0}$

para a temperatura e frequência do ensaio correspondente ao valor absoluto do módulo complexo. Os módulos de deformabilidade das misturas betuminosas novas determinam-se tendo em conta as temperaturas representativas da região, o tipo de betume, a frequência de solicitação e o tipo das misturas betuminosas que serão executadas.

O valor típico para o coeficiente de Poisson para misturas betuminosas é de 0,35 a 0,40, podendo adotar-se valores entre 0,15 a 0,45. Os valores mais baixos do coeficiente de Poisson correspondem a temperaturas mais baixas, Antunes (1993).

2.6.1.1 Previsão do módulo de deformabilidade das misturas betuminosas

No projeto de pavimentos em Portugal é usual definir o módulo de deformabilidade das misturas betuminosas de acordo com a metodologia proposta pela Shell (1978) ou pela metodologia proposta pela Universidade de Nottingham, Brown et al. (1985). Os módulos de rigidez das misturas betuminosas determinam-se tendo em conta as temperaturas representativas da região onde se vão construir os pavimentos, o tipo de betume e o tipo das misturas betuminosas que irão ser aplicadas.

2.6.1.1.1 Rigidez do betume

A determinação do módulo de deformabilidade das misturas betuminosas é definida a partir do valor de rigidez do betume. Assim, em vez da aplicação direta do ábaco de Van der Poel (Shell, 1978), o módulo de rigidez do betume é aproximado pela fórmula de Ullidtz e Peattie (1980):

$$S_b = 1,157 \times 10^{-7} \times t_c^{-0.368} \times 2,718^{-IP_{rec}} \times (Tab_{rec} - T_{mistura})^5 \quad (2.13)$$

em que, t_c é o tempo de carregamento (s), Tab_{rec} é a temperatura de amolecimento (°C), pelo método de anel e bola, que é uma medida indireta da viscosidade do betume, $T_{mistura}$ é a temperatura de projeto a que se encontra a mistura betuminosa e IP_{rec} é o índice de penetração do betume.

A equação 2.15, só é válida para tempos de carregamento entre 0,01 s e 0,1 s, para valores de diferença entre a temperatura de amolecimento e a temperatura da mistura entre $20^\circ C \leq Tab_{rec} - T_{mistura} \leq 60^\circ C$ e para índices de penetração do betume entre $-1 \leq IP_{rec} \leq 1$.

Em Portugal, em projetos rodoviários de dimensionamento, as temperaturas de projeto das camadas em misturas betuminosas são calculadas a partir das temperaturas mensais do ar observadas na região e calculadas a uma profundidade correspondente a meia altura da camada em análise, ver ponto 2.4.1. Para uma dada velocidade de circulação do tráfego pesado em km/h (v), o correspondente tempo de carga (t) em segundos é dado por:

$$t_c = \frac{1}{v} \quad (2.14)$$

De forma aproximada, (Kennedy, 1985) o ponto de amolecimento de anel e bola do betume recuperado em °C (Tab_{rec}) é obtido pela seguinte expressão:

$$Tab_{rec} = 98,4 - 26,4 \times \log Pen_{rec} \quad (2.15)$$

Tal como proposto por (Kennedy, 1985) para as condições Inglesas, considera-se que o betume sofre um endurecimento de 0,65 relativamente à penetração original ($Pen_{nominal}$) em 10^{-1} mm, devido ao aquecimento a que é submetido durante as operações de fabrico da mistura, assim:

$$Pen.rec = 0,65 \times Pen.nominal \quad (2.16)$$

O índice de penetração (IP_{rec}) do betume utilizado na mistura betuminosa é dado pela seguinte expressão, Brown et al. (1985):

$$IP_{rec} = \frac{1951 - 500 \times \log Pen.rec - 20 \times Tab_{rec}}{50 \times \log Pen.rec - Tab_{rec} - 120,1} \quad (2.17)$$

2.6.1.1.2 Metodologia Shell

De acordo com a metodologia Shell (1978) o módulo de deformabilidade de uma mistura betuminosa, para valores de rigidez do betume entre 5 MPa e 1000 MPa, pode ser estimado calculado recorrendo à seguinte expressão:

$$\log E_{mistura} = \frac{M+N}{2}(\log S_b - 8) + \frac{M-N}{2}|S_b - 8| + B \quad (2.18)$$

em que:

$$M = \frac{1,12(A-B)}{\log 30} \quad (2.19)$$

$$N = 0,6 \left(\frac{1,37 V_b^2 - 1}{1,33 V_b - 1} \right) \quad (2.20)$$

$$B = 8 + 10^{-3} (5,68 V_a + 0,2135 V_a^2) \quad (2.21)$$

$$A = 10,82 - 1,342 \left(\frac{100 - V_a}{V_a + V_b} \right) \quad (2.22)$$

sendo V_b a percentagem volumétrica de betume, V_a a percentagem volumétrica de agregado na mistura betuminosa e $E_{mistura}$ o módulo de deformabilidade da mistura betuminosa em (Pa).

2.6.1.1.3 Metodologia Universidade de Nottingham

O módulo de deformabilidade da mistura betuminosa é calculado recorrendo à expressão proposta por Brown et al. (1985), válida para uma rigidez do betume superior a 5 MPa:

$$E_{mistura} = S_b \left(1 + \frac{257,5 - 2,5 VMA}{n(VMA - 3)} \right)^n \quad (2.23)$$

em que $VMA = V_b + V_v$, é o volume de vazios na mistura de agregados, sendo V_b a percentagem volumétrica de betume e V_v é a percentagem volumétrica de vazios na mistura. O expoente n é dado por:

$$n = 0,83 \log \left(\frac{4 \times 10^4}{S_b} \right) \quad (2.24)$$

Na Tabela 2.17 são apresentadas a composição volumétrica e o índice de penetração para as classes de betumes tradicionalmente adotadas em Portugal. A velocidade de projeto dos veículos pesados pode variar entre 30 km/h (ramos e nós) até à velocidade máxima legal dos veículos pesados na via.

Tabela 2.17 – Camadas em misturas betuminosas tradicionais fabricadas a quente – Composição volumétrica e penetração nominal

Tipo de mistura	V_b	V_v	$P_{pen,nominal} (x10^{-1}mm)$	
	(%)	(%)	35/50	50/70
Camada de desgaste	12,0	4,0	42,5	60,0
Camada de ligação e base	10,0 (9,0)	6,0 (7,0)		

2.6.1.2 Previsão do módulo de deformabilidade das misturas – Fórmula de Witczak

No novo método de dimensionamento de pavimentos rodoviários, NCHRP (2004), AASHTO (2008), Simões et al. (2013), o módulo dinâmico E^* é adotado como módulo de deformabilidade das misturas betuminosas. O novo método de dimensionamento, tem três níveis possíveis de análise, dependendo da quantidade e qualidade dos dados, sendo o nível 1 o mais exigente. Para todos os níveis os valores do módulo de deformabilidade são definidos com base na curva mestra do módulo de deformabilidade dinâmico. No nível 3 adota-se a equação 2.2, proposta por Bari e Witczak (2006), que depende de valores experimentais do betume, de propriedades volumétricas da mistura e da distribuição granulométrica dos agregados:

$$\log E^* = -1,25 + 0,029 \rho_{200} - 0,018 (\rho_{200})^2 - 0,028 \rho_4 - 0,058 V_v - 0,0822 \frac{V_b}{V_b + V_v} + \frac{3,872 - 0,0021 \rho_4 + 0,004 \rho_{38} - 0,000017 (\rho_{38})^2 + 0,0055 \rho_{34}}{1 + e^{(-0,603313 - 0,313351 \log(f) - 0,393532 \log(\eta))}} \quad (2.25)$$

Em que E^* é o módulo de deformabilidade a adotar para a mistura betuminosa (10^5 Psi), η é a viscosidade dinâmica do betume (10^6 Poise \rightarrow 1Pa.s = 10 Poise), ρ_{200} é a percentagem de agregado que passa no peneiro # 200 (0,075 mm), ρ_4 é a percentagem de agregado que fica retida no peneiro # 4 (4,76 mm), ρ_{38} é a percentagem de agregado que fica retida no peneiro # 3/8 in (9,5 mm), ρ_{34} é a percentagem de agregado que fica retida no peneiro # 3/4 in (19,0 mm), V_v é o volume de vazios e V_b é a percentagem volumétrica de betume.

A viscosidade dinâmica do betume obedece à seguinte equação:

$$\log(\log(\eta)) = A + VTS \log T_R \quad (2.26)$$

Em que η é a viscosidade dinâmica do betume em (cp), A é a ordenada na origem, VTS é o declive da reta e T_R é a temperatura da mistura em ($^{\circ}$ Rankine). Assim, conhecendo a viscosidade dinâmica do betume para duas temperaturas diferentes é possível determinar os coeficientes A e VTS .

É ainda conhecido que a viscosidade dinâmica do betume se relaciona com o módulo complexo da rigidez de corte do betume através de, Bari e Witczak (2006):

$$\eta = \frac{G_b^*}{10} \left(\frac{1}{\sin(\phi)} \right) \quad (2.27)$$

Em que η é a viscosidade dinâmica do betume em (cp), G_b^* é o módulo de distorção complexo do betume e ϕ é o ângulo de fase do betume.

Da análise da equação de Witczak verifica-se que o módulo de deformabilidade de cálculo da mistura betuminosa é influenciado pela composição granulométrica, pelo comportamento do betume à temperatura e à frequência de cálculo e pela percentagem volumétrica de betume e de vazios.

Uma metodologia semelhante é adotada no procedimento de dimensionamento definido pelo estado do Minnesota, MnPave (2008). Em MnPave (2008), a expressão que relaciona a frequência de cálculo com a velocidade de circulação de projeto é dada por:

$$f = 0,1904(v)^{1,0044} \quad (2.28)$$

Em que v é a velocidade de projeto dos veículos pesados. A aplicação da fórmula de Witczak em pavimentos rodoviários nacionais apresenta algumas dificuldades, nomeadamente o facto de as curvas granulométricas do EP (2014) adotarem atualmente os peneiros da norma europeia (EN) e não os da norma ASTM para o qual a regressão foi realizada; é igualmente necessário definir a viscosidade dinâmica do betume que é uma propriedade que, em geral, não consta nos catálogos dos fabricantes.

Na Tabela 2.19 são apresentados os valores de referência A e VTS adotados para a equação da viscosidade dinâmica por Chomicz-Kowalska (2015). Na Tabela 2.19 são apresentados os valores de referência da curva granulométrica adotados, com base nos valores indicados em Branco et al. (2008), em que se adotam ainda os peneiros ASTM para as misturas betuminosas tradicionais em Portugal. A composição volumétrica é igual à definida anteriormente na Tabela 2.17.

Tabela 2.18 – Viscosidade dinâmica – Valores de referência de A e VTS, Chomicz-Kowalska (2015)

a) Classe de betume 35/50

Betume 35/50						
T (°C)	T (°K)	T (°R)	η (Pa.s)	η (cp)	A	VTS
90,0	363,2	653,7	26,11	26110,0	10,32975	-3,43993
135,0	408,2	734,7	0,902	902,0		

b) Classe de betume 50/70

Betume 50/70						
T (°C)	T (°K)	T (°R)	η (Pa.s)	η (cp)	A	VTS
90,0	363,2	653,7	14,430	14430,0	10,99539	-3,685631
135,0	408,2	734,7	0,506	506,0		

Tabela 2.19 – Parâmetros da equação de Witczak – Valores de referência da curva granulométrica, Branco et al. (2008)

Tipo de mistura	ρ_{200} (%)	ρ_4 (%)	ρ_{38} (%)	ρ_{34} (%)	V_b (%)	V_v (%)
Camada de desgaste	7,0	51,0	29,0	0,0	12,0	4,0
Camada de ligação e base	5,0	56,5	39,0	2,5	10,0	6,0

Na Figura 2.7 apresenta-se a variação do módulo de deformabilidade, em misturas betuminosas (desgaste e base) com betume da classe 35/50, para os vários valores de temperatura e velocidade de circulação, comparando-se os valores obtidos pela metodologia Universidade de Nottingham (UN), usualmente adotada em Portugal, e pela metodologia baseada na aplicação da equação de Witczak.

Verifica-se que a equação de Witczak, para valores de temperatura de serviço mais baixos, prevê módulos de deformabilidade mais baixos que a metodologia UN. No entanto, para valores de temperaturas da ordem dos 35° C, a previsão com base na equação de Witczak já conduz a valores de deformabilidade da mesma ordem de grandeza que os previstos pela metodologia UN. Com base na Figura 2.7, também é possível verificar que o andamento da variação do módulo de deformabilidade com a temperatura de projeto é similar em ambas as metodologias.

2 Dimensionamento de pavimentos rodoviários: Experiência Portuguesa

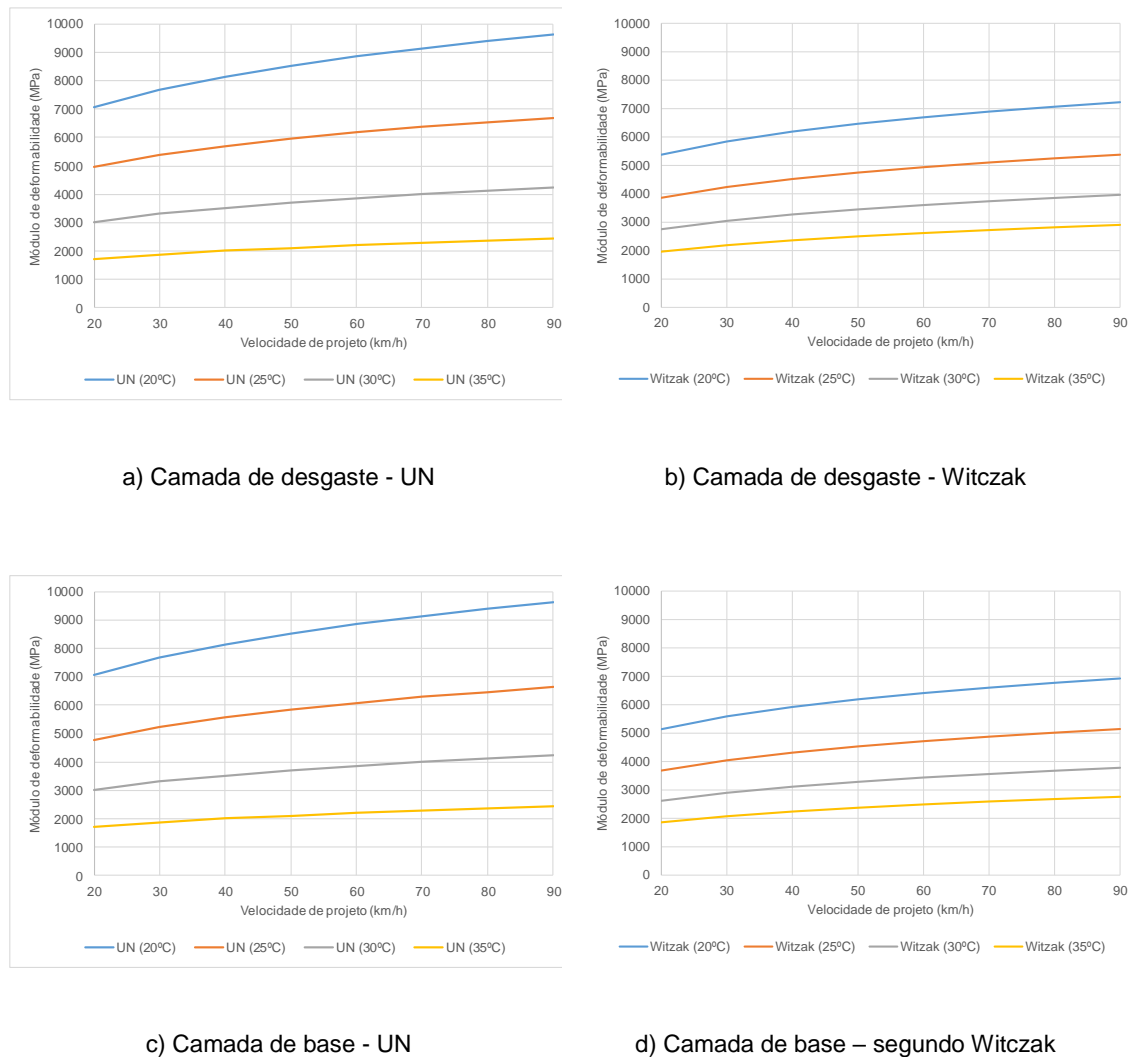


Figura 2.6 – Variação do módulo de deformabilidade em misturas betuminosas (desgaste e base) para uma classe de betume 35/50 segundo a metodologia UN e segundo a equação de Witczak

2.6.2 Materiais granulares

Os materiais granulares são materiais naturais (solos granulares) ou britados empregues em camadas de sub-base e de base, JAE (1995). O comportamento dos materiais granulares depende principalmente das seguintes características (JAE, 1995):

- Natureza dos agregados (petrografia e estrutura);
- Forma dos agregados (lamelação e alongamento);
- Propriedades físicas dos agregados (porosidade, dureza, resistência ao desgaste, alterabilidade);
- Granulometria adotada, em particular da percentagem de material fino passado no peneiro nº 200 ASTM;
- Quantidade de elementos britados.

A exigência sobre as características dos materiais granulares é maior sobre os materiais britados destinados a camada de base (BG) do que sobre os materiais britados (SbG) ou materiais naturais (GN e SS) destinados a camadas de sub-base.

O módulo de deformabilidade das camadas granulares depende da compactidade, do teor em água e do estado de tensão, JAE (1995). O módulo de deformabilidade de materiais granulares com estado de tensão triaxial é do tipo:

$$E_s = k_1 (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)^{k_2} = k_1 (\theta)^{k_2} \quad (2.29)$$

Em que θ é o primeiro invariante do tensor de tensões e k_1 e k_2 são parâmetros característicos dos materiais e que podem ser obtidos com base em ensaios triaxiais. Na prática, tal como nos solos, recorre-se em geral a métodos expeditos baseados em relações empíricas para estimar módulos de deformabilidade. Em Claessen et al. (1977) é proposto que o módulo de deformabilidade (MPa) seja estimado a partir do módulo de deformabilidade da camada subjacente com base em:

$$E_g = k \times E_{gi} \quad (2.30)$$

Em que E_g é o módulo de deformabilidade da camada granular em apreço (MPa), E_{gi} é o módulo de deformabilidade da camada subjacente (MPa) e k é dado por $k = 0,2 h_g^{0,45}$ sendo h_g a espessura da camada granular em apreço, em milímetros.

Tal como indicado em Claessen et al. (1977), o valor de k não deve ser inferior a 1,5, de forma a garantir que a camada superior seja mais resistente que a camada inferior, nem superior a 4,0, pois só com condições de execução muito controladas é que se poderá admitir uma resistência quatro vezes superior.

Em JAE (1995), é indicado que, para material granular não britado, se deve limitar o valor máximo de k obtido com a fórmula Shell a 1,50.

O valor típico para o coeficiente de Poisson para materiais granulares é de 0,35, podendo adotar-se valores entre 0,30 a 0,40. O valor máximo do módulo de deformabilidade considerado para materiais granulares em camada de base é usualmente de 400 a 450 MPa. Em experiências em obra, através da realização de ensaios de carga, existem evidências reconhecidas que uma camada granular normalmente apresenta valores máximos desta ordem de grandeza. Como referência, no guia de dimensionamento LCPC/SETRA (1994) é admitido um valor máximo de 600 MPa para camadas granulares em material britado.

Atualmente em projetos rodoviários em estradas nacionais são usualmente adotados para camada de base e sub-base agregados britados de granulometria extensa (ABGE) com os

requisitos indicados na Tabela 2.17 e com uma curva granulométrica respeitando os limites mínimo e máximo indicados na Figura 2.6, EP (2014)

Tabela 2.20 – Camadas não ligadas – Requisitos dos agregados britados, EP (2014)

Agregado britado em granulometria extensa (ABGE)		
Requisitos/Propriedades	Camada de sub-base	Camada de base
Forma do agregado grosso - Índice de achatamento	$\leq 45\%$	$\leq 30\%$
Resistência à fragmentação do agregado grosso, coeficiente Los Angeles	$\leq 45\%$	$\leq 40\%$
Resistência ao desgaste por atrito do agregado grosso, coeficiente micro-Deval	M_{DE35}	
Qualidade dos finos - Valor de equivalente de areia, mínimo e Valor do ensaio de azul de metileno, máximo	Se a percentagem de passados no peneiro de 0,063 mm for inferior a 3 % os finos podem ser considerados não prejudiciais. Se o teor total de finos for superior a 3 %, então $SE \geq 40$. Caso $SE < 40$, então $MB \leq 2,5$	Se a percentagem de passados no peneiro de 0,063 mm for inferior a 3 % os finos podem ser considerados não prejudiciais. Se o teor total de finos for superior a 3 %, então $SE \geq 50$. Caso $SE < 50$, então $MB \leq 2,0$

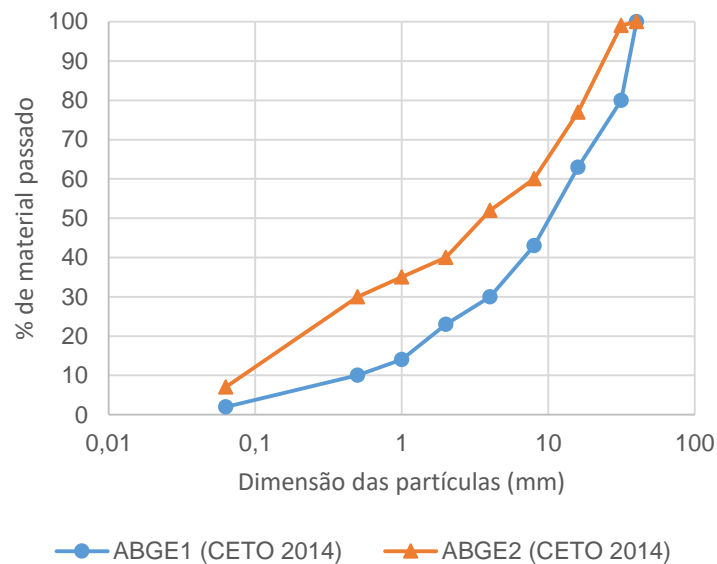


Figura 2.7 – Curvas granulométricas limite para material do tipo agregado britado em granulometria extensa (ABGE) em camada de sub-base e base, EP (2014)

2.6.3 Materiais com ligantes hidráulicos

O comportamento dos materiais tratados com ligantes hidráulicos pode ser considerado elástico-linear desde que as tensões induzidas não ultrapassem valores da ordem de 55% a 70% da sua resistência, Antunes (1993).

O módulo de deformabilidade dos materiais tratados com ligantes hidráulicos pode ser determinado através de ensaios laboratoriais (ensaio de tração, compressão, flexão ou ultrassons), dependendo o seu valor do tipo de agregado e granulometria, da compactação da

mistura, da dosagem e tipo de ligante, das condições de cura e da idade em que é realizado o ensaio.

Em JAE (1995) é indicado que, previamente à aplicação destes materiais em obra, deve ser realizado um estudo da formulação que defina a composição da mistura e as condições de compactação de modo a garantir os requisitos mínimos de resistência. Na Tabela 2.21 indicam-se os valores de referência de diversos materiais para o dimensionamento de pavimentos rodoviários.

Tabela 2.21 – Valores de referência das características mecânicas dos materiais com ligantes hidráulicos, JAE (1985) e Antunes (1993)

Material	Módulo de deformabilidade (MPa)	Coeficiente de Poisson	Rcd,28 (MPa)
Betão de cimento (BS)	30000	0,2 (0,10 a 0,20)	a especificar
Betão pobre (Bp)	20000	0,25	
Agregado tratado com cimento (AGEC)	15 000	0,25 (0,15 a 0,30)	≥ 1,0 MPa
Solo-cimento (SC)	2 000	0,25	≥ 0,3 MPa

Rcd,28 (MPa) - Resistência à tração em compressão diametral aos 28 dias

2.7 Critérios de dimensionamento

Os critérios geralmente utilizados para a verificação da capacidade de resistência dos pavimentos têm como objetivo evitar que estes atinjam determinados estados limite, que estão relacionados com a degradação das suas características estruturais sob a ação do tráfego, Antunes (1993). Os critérios de ruína adotados nos métodos empírico-mecanicistas de dimensionamento de pavimentos rodoviários (flexíveis e semi-rígidos) são os seguintes (Figura 2.8):

- Critério de fadiga, controlado pela extensão horizontal de tração na base das camadas betuminosas, dado ser esta a zona geralmente mais tracionada. Este critério está relacionado com o controle do fendilhamento excessivo que tem início nas zonas mais tracionadas;
- Critério de deformação permanente, controlado pela extensão vertical de compressão no topo do solo de fundação. Com este critério pretende-se controlar o assentamento excessivo à superfície do pavimento;
- Critério de fadiga, controlado pela tensão horizontal de tração na base dos materiais com ligantes hidráulicos. Este critério está relacionado com o controle do fendilhamento excessivo dos materiais em ligantes hidráulicos.

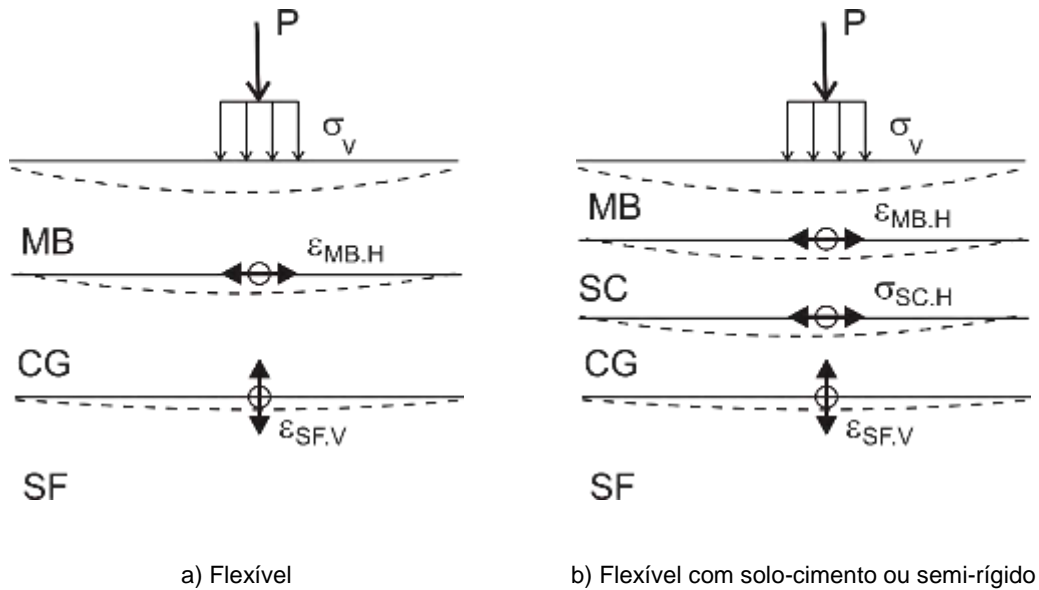


Figura 2.8 – Critérios de dimensionamento para pavimentos rodoviários

2.7.1 Solos de fundação

O critério de dimensionamento do solo de fundação tem por objetivo limitar a ocorrência de excessivas deformações permanentes da fundação e o consequente aparecimento de cavados de rodeira à superfície do pavimento, INIR (2012).

Em projetos rodoviários nacionais, para o valor limite da extensão vertical de compressão (ε_{vsf}) adota-se em geral, INIR (2012), o critério de dimensionamento mais exigente proposto pela Shell (1978). A que corresponde um grau de confiança de 95%:

$$\varepsilon_{v.sf} = 0,018 \, N^{-0,25} \quad (2.31)$$

Sendo N o número de aplicações de carga do eixo padrão.

2.7.2 Misturas betuminosas

O critério de dimensionamento das misturas betuminosas tem por objetivo limitar a ocorrência de fendilhamento por fadiga e o consequente aparecimento de fendas à superfície do pavimento, INIR (2012).

Em projetos rodoviários nacionais, para o valor limite da extensão horizontal de tração ($\varepsilon_{t.mb}$), adota-se em geral, INIR (2012), o critério de dimensionamento proposto pela Shell (1978), dado por:

$$\varepsilon_{t.mb} = (0,856 \, V_b + 1,08) \, (E_{mistura})^{-0,36} \, N^{-0,2} \quad (2.32)$$

Sendo N o número de aplicações de carga do eixo padrão, E_{mistura} o módulo de deformabilidade da mistura (Pa) e V_b a percentagem volumétrica de betume.

2.7.3 Materiais com ligantes hidráulicos

O critério de dimensionamento dos materiais com ligantes hidráulicos tem por objetivo limitar a ocorrência de fendilhamento por fadiga e o consequente aparecimento de fendas à superfície do pavimento, INIR (2012).

Em projetos rodoviários nacionais, para o valor limite da tensão horizontal de tração ($\sigma_{t,mh}$), adota-se em geral, INIR (2012), o critério de dimensionamento proposto em JAE (1995), dado por:

$$\sigma_{t,mh} = (1 - \alpha \log N) \times (R_{ft}) \quad (2.33)$$

Sendo N o número de aplicações de carga do eixo padrão, R_{ft} a resistência à tração sob flexão do material aos 28 dias (MPa), que pode ser estimada como sendo 1,5 vezes superior à resistência à tração em compressão diametral, e α uma constante que depende do material, sendo corrente a utilização de valores entre 0,06 e 0,1. Os menores valores de α devem ser adotados para materiais com maior quantidade de cimento e maior necessidade de controlo de qualidade na produção.

2.7.4 Lei de Miner

O dano associado a um dado eixo não é mais do que o quociente entre número de passagens de projeto (N_{projeto}), definido aquando da caracterização do tráfego e o número de passagens admissível ($N_{\text{admissível}}$), definido com base na aplicação dos critérios de dimensionamento anteriormente definidos (é o mínimo valor admissível):

$$D_{\text{total}} = D_{\text{eixo}} = \frac{N_{\text{projeto}}}{N_{\text{admissível}}} \quad (2.34)$$

Caso a análise se realize com base no método do eixo padrão e com base numa única temperatura equivalente do ar, o dano obtido é um valor único e tem de ser comparado com o dano máximo admissível. Em geral, admite-se que o dano admissível para projetos rodoviários deve variar entre 80% a 100%.

É de referir que atualmente alguns dos organismos responsáveis pela revisão de projetos rodoviários (IP, SA) indicam que os valores de dano devem estar na ordem dos 70%, aumentando assim o coeficiente de segurança da estrutura dimensionada.

Caso se adote diretamente o espectro de tráfego de eixos, numa primeira fase, calcula-se o dano associado a cada eixo, obtendo-se o dano total com base na lei de Miner, em que o dano total é igual à soma dos danos calculados de forma separada:

$$D_{\text{total}} = \sum_{i=1}^{n_{\text{total.eixo}}} D_{\text{eixo},i} = \sum_{i=1}^{n_{\text{total.eixo}}} \frac{N_{\text{projeto},i}}{N_{\text{admissivel},i}} \quad (2.35)$$

Caso se admita que a análise, em vez de ser realizada para um só valor de temperatura do ar equivalente de projeto, é realizado para cada valor mensal de temperatura do ar equivalente de projeto, resulta da lei de Miner:

$$D_{\text{total}} = \sum_{j=1}^{12} \sum_{i=1}^{n_{\text{total.eixo}}} D_{\text{eixo},i,j} = \sum_{j=1}^{12} \sum_{i=1}^{n_{\text{total.eixo}}} \frac{N_{\text{projeto},i,j}}{N_{\text{admissivel},i,j}} \quad (2.36)$$

2.8 Análise estrutural

A análise estrutural de pavimentos rodoviários para cargas verticais pode ser realizada com base em vários modelos numéricos: método dos elementos finitos, método dos elementos discretos, método da espessura equivalente e métodos de análise elástica multicamada, Antunes (1993). Modelos numéricos baseados no método dos elementos finitos ou no método dos elementos discretos permitem a adoção de modelos de comportamento mais complexos que incluem:

- Comportamento não linear dos solos e materiais granulares;
- Presença de descontinuidades tais como fendas e juntas;
- Comportamento viscoelástico dos materiais betuminosos;
- Distribuição espacial das propriedades dos materiais e possível anisotropia dos materiais constituintes do pavimento;
- Distribuições de pressões de contacto entre os pneus e o pavimento mais aproximadas da realidade.

No entanto, mesmo nas metodologias empírico-mecanicistas mais recentes, AASHTO (2004), continua a ser possível realizar o dimensionamento de pavimentos rodoviários com base em modelos de comportamento elástico linear e, desta forma, os modelos numéricos multicamada continuam a ser adotados.

No modelo multi-camada (Figura 2.9) admite-se que a estrutura é composta por camadas horizontais, contínuas, homogéneas, de espessura constante e constituídas por materiais isotrópicos com comportamento elástico-linear, assentes sobre um meio semi-infinito. É ainda de referir que este tipo de modelos é computacionalmente mais eficiente que os modelos baseados no método dos elementos finitos e os parâmetros de entrada são muito mais simples, dado não ser necessário definir com exatidão o domínio a analisar.

Neste trabalho utilizaram-se programas de multicamada que possibilitam a análise de interfaces não lineares, tais como BISAR, Jong et al. (1979) e o modelo multicamada MulPA desenvolvido por Monteiro Azevedo e Marecos (2010), que permite a adoção de um maior número de camadas e de pontos de avaliação do estado de tensão e que segue os princípios indicados por Hayhoe (2002) e Maina e Matsui (2005).

Os parâmetros de entrada dos programas multicamada consistem na definição do número de camadas e respectivas espessuras, das propriedades elásticas de cada camada, do número de rodados e da sua localização em planta, do valor da carga, do raio de impressão de cada rodado e do número de pontos onde se pretende determinar os deslocamentos, o tensor das deformações e o tensor das tensões, com as suas respectivas localizações em profundidade e em planta.

Os programas multicamada admitem de forma simplificada que cada carga vertical associada a cada rodado tenha uma área de contacto circular. Com base nesta hipótese, os programas multicamada determinam os estados de tensão e de deformação induzido nas camadas constituintes do pavimento e na respetiva fundação.

Os parâmetros de saída dos programas multicamadas são os deslocamentos, os tensores de deformações e os tensores de tensões nos pontos previamente seleccionados.

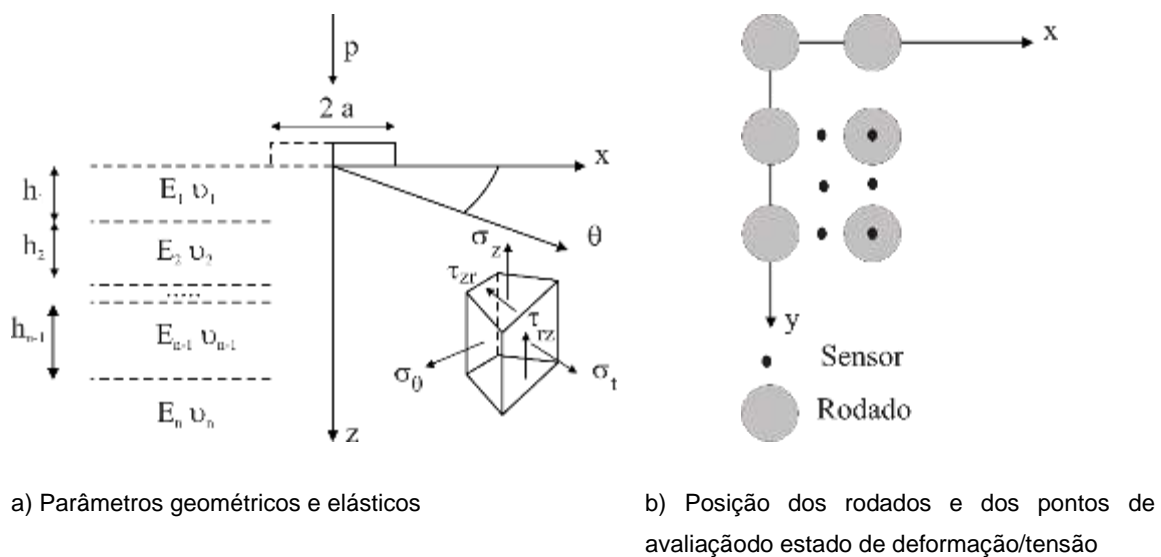


Figura 2.9 – Modelo de análise multicamada em coordenadas cilíndricas

2.9 Aplicações

2.9.1 Espectro de eixos versus eixo padrão

A metodologia de dimensionamento baseada no espectro de eixos é aplicada na verificação estrutural de três estruturas de pavimento rodoviário do tipo flexível e a uma estrutura de pavimento rodoviário do tipo semi-rígido, ver Figura 2.10. A metodologia de cálculo para eixos duplos e triplos tem por base a metodologia de cálculo adotada no dimensionamento de pavimentos aeroportuários, FAA (2009) e Alves et al. (2016), no qual a dispersão lateral pode ser desprezada. Em pavimentos rodoviários apenas é tido em consideração o fator tandem (F_{tnd}), Alves et al. (2016), que é definido com base na geometria do eixo e na estrutura de pavimento. Nos exemplos apresentados o fator de tandem obtido, é em regra igual 1,0 nos eixos simples, a 2,0 para os eixos duplos e a 3,0 para os eixos triplos. A verificação estrutural de cada eixo é realizada para um valor de passagens de eixos obtido da multiplicação do número de passagens de eixo do espectro pelo fator de tandem ($N_{\text{projeto, dimensionamento}} = N_{\text{projeto, eixo}} \times F_{\text{tnd}}$).

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v	Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa em camada de desgaste do tipo AC 14 surf 35/50 (BB)	5		3900	0,3	1	Mistura betuminosa em camada de desgaste do tipo AC 14 surf 35/50 (BB)	5		3900	0,3
2	Mistura betuminosa em camada de ligação do tipo AC 20 bin 35/50 (MB)	5		4000	0,3	2	Mistura betuminosa em camada de ligação do tipo AC 20 bin 35/50 (MB)	7		4100	0,3
3	Mistura betuminosa em camada de base do tipo AC 20 base 35/50 (MB)	6		4400	0,3	3	Mistura betuminosa em camada de base do tipo AC 20 base 35/50 (MB)	8		4500	0,3
4	Camada granular de base em ABGE	20		400	0,3	4	Camada granular de base em ABGE	20		260	0,3
5	Camada granular de sub-base em ABGE	20		200	0,3	5	Camada granular de sub-base em ABGE	20		125	0,3
6	Solo de fundação - Classe F3 do Macopav	∞		100	0,4	6	Solo de fundação - Classe F2 do Macopav	∞		60	0,4

a) F1 – Pavimento flexível

b) F2 – Pavimento flexível

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v	Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa em camada de desgaste do tipo AC 14 surf 35/50 (BB)	5		3900	0,3	1	Mistura betuminosa em camada de desgaste do tipo AC 14 surf 35/50 (BB)	5		3900	0,3
2	Mistura betuminosa em camada de ligação do tipo AC 20 bin 35/50 (MB)	5		4000	0,3	2	Mistura betuminosa em camada de ligação do tipo AC 20 bin 35/50 (MB)	6		4100	0,3
3	Mistura betuminosa em camada de base do tipo AC 20 base 35/50 (MB)	6		4400	0,3	3	Mistura betuminosa em camada de base do tipo AC 20 base 35/50 (MB)	7		4400	0,3
4	Camada em solo-cimento	20		2000	0,3	4	Camada em AGECE	20		15000	0,2
5	Solo de fundação - Classe F3 do Macopav	∞		100	0,4	5	Camada granular de sub-base em ABGE	20		200	0,3
						6	Solo de fundação - Classe F3 do Macopav	∞		100	0,4

c) F3 – Pavimento flexível (camada estabilizada)

d) SR1 – Pavimento semi-rígido

Figura 2.10 – Modelo de análise para verificação estrutural – Metodologia UN

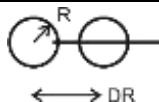
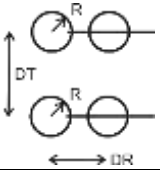
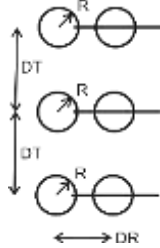
Considera-se que o tráfego é enquadrável na classe T4, com um valor de tráfego médio diário anual de 500 veículos pesados no ano de abertura por sentido e na via mais solicitada. Admite-se uma velocidade de circulação dos veículos pesados de 50 km/h e que a estrada se localiza na região de Faro. As temperaturas de serviço nas misturas betuminosas são definidas com base na metodologia Shell (2.4.1) a meia camada. Admite-se que o eixo-padrão equivalente é o eixo de 130 kN, quer nos pavimentos flexíveis, quer nos pavimentos semi-rígidos. Admite-se que o espectro modelizado por eixos é o indicado na Tabela 2.11 para a distribuição de veículos pesados indicada.

Os módulos de deformabilidade das misturas betuminosas foram calculados com base na metodologia da UN (2.6.1.1.3). Na verificação estrutural do eixo padrão adota-se o valor do número de passagens dado pela aplicação da metodologia da JAE (1995) e também o número de passagens de eixos das várias hipóteses de expoente e equivalência de carga definidas em 2.3.2, para pavimentos flexíveis e para pavimentos semi-rígidos.

Para o solo-cimento admite-se uma resistência à tração em flexão aos 28 dias de 0,72 MPa e para o material AGECE admite-se um valor de resistência à tração em flexão aos 28 dias de 1,5 MPa. Em ambos os materiais adotou-se um valor de expoente de 0,08 para a definição do critério de dimensionamento à fadiga, ver secção 2.7.1.

O eixo simples é dado por um rodado duplo com as características definidas em MnPave (2008), os eixos em tandem e em “tridem” também são igualmente em rodado duplo, MnPave (2008). Em todos os rodados adota-se uma pressão de enchimento de 0,689 MPa, MnPave (2008), Tabela 2.22.

Tabela 2.22 – Eixos tipo adotados na verificação por espectro de eixos, MnPave (2008)

Tipo	R (m)	DR (m)	DT (m)	p (MPa)	Configuração (Planta)
Eixo simples	*	0,343	1,372	0,689	
Eixo duplo	*	0,343	1,372	0,689	
Eixo triplo	*	0,343	1,372	0,689	

* o raio de impressão é definido em função da carga por eixo

Na Tabela 2.23 apresenta-se a verificação estrutural para o pavimento tipo F1. Verifica-se que a análise por espectro de eixos conduz a valores de dano no solo de fundação superiores aos previstos pela metodologia do eixo padrão equivalente, para os vários valores indicados. Na verificação na base das misturas betuminosas verificam-se valores da mesma ordem de grandeza.

Tabela 2.23 – Verificação estrutural para o pavimento tipo F1

a) Espectro de eixos

Eixo	Peso (Ton)	Nº de passagens no horizonte de projeto	Misturas betuminosas (MB)	Solo de fundação (SF)	Dano	
			Extensão horizontal ($\times 10^{-6}$) (cálculo)	Extensão vertical ($\times 10^{-6}$) (cálculo)	MB	SF
Simples	4	4961154	53,827	116,019	0,007	0,009
Simples	5	391284	66,584	145,447	0,002	0,002
Simples	6	169013	78,971	174,744	0,002	0,002
Simples	8	434760	101,568	230,050	0,014	0,012
Simples	9	641271	113,282	258,971	0,036	0,027
Simples	10	2886806	124,761	287,762	0,259	0,189
Simples	12	353786	147,001	344,957	0,072	0,048
Simples	16	107060	189,167	455,014	0,077	0,044
Duplo	10	86952	60,351	146,453	0,000	0,001
Duplo	12	19564	71,359	175,962	0,000	0,000
Duplo	14	43476	81,476	203,877	0,001	0,001
Duplo	16	1208633	92,398	233,137	0,048	0,068
Duplo	17	244552	97,861	247,719	0,013	0,018
Duplo	20	364111	113,425	289,827	0,041	0,049
Duplo	28	191294	153,784	403,187	0,098	0,096
Duplo	29	10869	158,197	415,977	0,006	0,006
Duplo	30	10869	163,058	430,159	0,007	0,007
Duplo	31	10869	167,874	444,309	0,009	0,008
Duplo	38	9782	199,902	541,099	0,019	0,016
Tripla	18	260856	70,523	177,179	0,004	0,007
Tripla	38	10869	133,522	368,277	0,004	0,006
Lei de Miner					0,719	0,616

b) Eixo padrão equivalente

Classe de tráfego	Nº de passagens no horizonte de projeto (Eixo padrão de 130 kN)	Misturas betuminosas (MB)	Solo de fundação (SF)	Dano	
		Extensão horizontal ($\times 10^{-6}$) (admissível)	Extensão vertical ($\times 10^{-6}$) (admissível)	MB	SF
T4, Equivalência espectro: H1	2,621E+06	169,333	447,359	0,789	0,308
T4, Equivalência espectro: H 2	3,031E+06	164,481	431,396	0,912	0,356
T4, JAE (1995)	3,117E+06	163,564	428,389	0,938	0,366
Valores de cálculo		161,481	333,279		

Na Tabela 2.24 apresenta-se a verificação estrutural para o pavimento tipo F2. Verifica-se igualmente que a análise por espectro de eixos conduz a valores de dano no solo de fundação

superiores aos previstos pela metodologia do eixo padrão equivalente, para os vários valores indicados. Na verificação na base das misturas betuminosas verificam-se valores da mesma ordem de grandeza.

Tabela 2.24 – Verificação estrutural para o pavimento tipo F2

a) Espectro de eixos

Eixo	Peso (Ton)	Nº de passagens no horizonte de projeto	Misturas betuminosas (MB)	Solo de fundação (SF)	Dano	
			Extensão horizontal ($\times 10^{-6}$) (cálculo)	Extensão vertical ($\times 10^{-6}$) (cálculo)	MB	SF
Simple	4	4961154	56,201	116,345	0,008	0,009
Simple	5	391284	69,415	145,962	0,002	0,002
Simple	6	169013	82,210	175,492	0,002	0,002
Simple	8	434760	105,471	231,360	0,016	0,012
Simple	9	641271	117,208	260,640	0,040	0,028
Simple	10	2886806	128,890	289,834	0,293	0,194
Simple	12	353786	151,659	347,967	0,081	0,049
Simple	16	107060	194,389	460,356	0,085	0,046
Duplo	10	86952	63,483	155,273	0,001	0,001
Duplo	12	19564	74,930	186,712	0,000	0,000
Duplo	14	43476	85,419	216,501	0,001	0,002
Duplo	16	1208633	96,085	247,776	0,056	0,087
Duplo	17	244552	101,283	263,382	0,015	0,022
Duplo	20	364111	117,355	308,523	0,046	0,063
Duplo	28	191294	159,011	430,618	0,111	0,125
Duplo	29	10869	163,561	444,447	0,007	0,008
Duplo	30	10869	168,571	459,793	0,008	0,009
Duplo	31	10869	173,533	475,118	0,010	0,011
Duplo	38	9782	206,498	580,320	0,021	0,021
Tripla	18	260856	73,682	197,932	0,005	0,011
Tripla	38	10869	138,156	413,818	0,005	0,009
Lei de Miner					0,813	0,711

b) Eixo padrão equivalente

Classe de tráfego	Nº de passagens no horizonte de projeto (Eixo padrão de 130 kN)	Misturas betuminosas (MB)	Solo de fundação (SF)	Dano	
		Extensão horizontal ($\times 10^{-6}$) (admissível)	Extensão vertical ($\times 10^{-6}$) (admissível)	MB	SF
T4, Equivalência espectro: H1	2,621E+06	167,968	447,359	0,848	0,528
T4, Equivalência espectro: H 2	3,031E+06	163,156	431,396	0,981	0,610
T4, JAE (1995)	3,117E+06	162,246	428,389	1,009	0,627
Valores de cálculo		162,532	381,272		

Na Tabela 2.25 apresenta-se a verificação estrutural para o pavimento tipo F3, com uma camada estabilizada com ligantes hidráulicos. Verifica-se que a análise por espectro de eixos conduz a valores de dano na base do solo-cimento inferiores aos previstos pela metodologia do eixo

2 Dimensionamento de pavimentos rodoviários: Experiência Portuguesa

padrão equivalente, para os vários valores indicados, excluindo os valores de eixo-padrão equivalente obtidos com o expoente de 33 que são claramente conservativos.

Tabela 2.25 – Verificação estrutural para o pavimento tipo F3

a) Espectro de eixos

Eixo	Peso (Ton)	Nº de passagens no horizonte de projeto	Misturas betuminosas (MB)	Solo-Cimento (SC)	Solo de fundação (SF)	Dano MB	Dano SC	Dano SF
			Extensão horizontal ($\times 10^{-5}$) (cálculo)	Tensão horizontal (MPa) (cálculo)	Extensão vertical ($\times 10^{-5}$) (cálculo)			
Simple	4	4961154	25,021	0,086	94,092	0,000	0,000	0,004
Simple	5	391284	29,936	0,107	117,950	0,000	0,000	0,001
Simple	6	169013	34,400	0,129	141,698	0,000	0,000	0,001
Simple	8	434760	41,840	0,169	186,509	0,000	0,000	0,005
Simple	9	641271	45,295	0,190	209,931	0,000	0,000	0,012
Simple	10	2886806	48,705	0,211	233,239	0,002	0,004	0,081
Simple	12	353786	54,871	0,254	279,513	0,000	0,003	0,021
Simple	16	107060	64,912	0,336	368,427	0,000	0,023	0,019
Duplo	10	86952	29,237	0,112	121,862	0,000	0,000	0,000
Duplo	12	19564	33,558	0,135	146,411	0,000	0,000	0,000
Duplo	14	43476	37,298	0,157	169,631	0,000	0,000	0,001
Duplo	16	1208633	40,900	0,180	193,965	0,001	0,001	0,033
Duplo	17	244552	42,584	0,191	206,090	0,000	0,000	0,008
Duplo	20	364111	47,084	0,224	241,095	0,000	0,002	0,023
Duplo	28	191294	57,036	0,313	335,249	0,001	0,032	0,046
Duplo	29	10869	57,999	0,323	345,863	0,000	0,003	0,003
Duplo	30	10869	59,036	0,334	357,630	0,000	0,004	0,003
Duplo	31	10869	60,038	0,345	369,368	0,000	0,007	0,004
Duplo	38	9782	69,564	0,421	449,584	0,000	0,125	0,008
Tripla	18	260856	33,450	0,144	151,125	0,000	0,000	0,004
Tripla	38	10869	53,808	0,299	314,050	0,000	0,002	0,003
Lei de Miner						0,004	0,206	0,280

b) Eixo padrão equivalente

Classe de tráfego	Nº de passagens no horizonte de projeto (Eixo padrão de 130 kN)	Misturas betuminosas (MB)	Solo cimento (SC)	Solo de fundação (SF)	Dano MB	Dano SC	Dano SF
		Extensão horizontal ($\times 10^{-5}$) (admissível)	tensão horizontal (MPa) (admissível)	Extensão vertical ($\times 10^{-5}$) (admissível)			
T4, Equivalência espectro: H1	2,555E+06	170,199	0,351	450,220	0,004	0,461	0,209
T4, Equivalência espectro: H2	3,172E+06	162,992	0,346	426,520	0,005	0,573	0,259
T4, Equivalência espectro: H3	2,056E+09	44,651	0,184	84,531	3,330	371,104	167,805
T4, Equivalência espectro: H4	2,915E+09	41,640	0,175	77,466	4,721	526,152	237,915
T4, JAE (1995)	3,804E+06	157,176	0,341	407,580	0,006	0,687	0,310
Valores de cálculo		56,797	0,332	304,241			

Na Tabela 2.26 apresenta-se a verificação estrutural para o pavimento tipo SR1, com uma camada estabilizada com ligantes hidráulicos. Verifica-se que a análise por espectro de eixos conduz a valores de dano na base do AGECE superiores aos previstos pela metodologia do eixo padrão equivalente, para os vários valores indicados, excluindo os valores de eixo-padrão equivalente obtidos com o expoente de 33 que são claramente conservativos.

De um modo geral, pode afirmar-se que a metodologia do espectro de eixos prevê um maior valor de dano no solo de fundação em pavimentos flexíveis, com base e sub-base granular, do que o método do eixo padrão equivalente, obtendo-se, no entanto, valores mais baixos de dano na base das misturas betuminosas. A metodologia de espectro de eixos em pavimentos flexíveis com

sub-base ou base em materiais hidráulicos conduz a valores muito diferentes dos obtidos com a metodologia do eixo padrão, e o mesmo acontece em pavimentos semi-rígidos pois as camadas com ligantes hidráulicos são sensíveis ao estado de tensão induzido no pavimento (equação 2.28).

Tabela 2.26 – Verificação estrutural para o pavimento tipo SR1

a) Espectro de eixos

Eixo	Peso (Ton)	Nº de passagens no horizonte de projeto	Misturas betuminosas (MB)	Solo-Cimento (SC)	Solo de fundação (SF)	Dano MB	Dano SC	Dano SF
			Extensão horizontal ($\times 10^{-6}$) (cálculo)	Tensão horizontal (MPa) (cálculo)	Extensão vertical ($\times 10^{-6}$) (cálculo)			
Simple	4	4961154	23,600	0,182	34,633	0,000	0,000	0,000
Simple	5	391284	20,319	0,229	43,460	0,000	0,000	0,000
Simple	6	169013	15,185	0,275	52,265	0,000	0,000	0,000
Simple	8	434760	14,381	0,361	68,935	0,000	0,000	0,000
Simple	9	641271	13,497	0,407	77,677	0,000	0,000	0,000
Simple	10	2886806	12,383	0,452	86,398	0,000	0,005	0,002
Simple	12	353786	9,644	0,543	103,776	0,000	0,004	0,000
Simple	16	107060	3,124	0,719	137,420	0,000	0,033	0,000
Duplo	10	86952	21,336	0,258	51,063	0,000	0,000	0,000
Duplo	12	19564	16,576	0,310	61,421	0,000	0,000	0,000
Duplo	14	43476	16,564	0,360	71,241	0,000	0,000	0,000
Duplo	16	1208633	16,191	0,412	81,558	0,000	0,002	0,001
Duplo	17	244552	15,892	0,438	86,708	0,000	0,001	0,000
Duplo	20	364111	14,686	0,514	101,615	0,000	0,004	0,001
Duplo	28	191294	9,746	0,718	142,001	0,000	0,117	0,001
Duplo	29	10869	9,086	0,741	146,582	0,000	0,010	0,000
Duplo	30	10869	8,337	0,767	151,666	0,000	0,017	0,000
Duplo	31	10869	7,573	0,793	156,746	0,000	0,028	0,000
Duplo	38	9782	2,347	0,969	191,657	0,000	0,735	0,000
Tripla	18	260856	17,967	0,348	70,577	0,000	0,000	0,000
Tripla	38	10869	14,502	0,729	147,888	0,000	0,012	0,000
Lei de Miner						0,000	0,968	0,005

b) Eixo padrão equivalente

Classe de tráfego	Nº de passagens no horizonte de projeto (Eixo padrão de 130 kN)	Misturas betuminosas (MB)	Solo cimento (SC)	Solo de fundação (SF)	Dano MB	Dano SC	Dano SF
		Extensão horizontal ($\times 10^{-6}$) (admissível)	tensão horizontal (MPa) (admissível)	Extensão vertical ($\times 10^{-6}$) (admissível)			
T4, Equivalência espectro: H1	2,555E+06	170,199	0,731	450,220	0,000	0,557	0,004
T4, Equivalência espectro: H2	3,172E+06	162,992	0,720	426,520	0,000	0,691	0,005
T4, Equivalência espectro: H3	2,056E+09	44,651	0,382	84,531	0,000	448,124	3,285
T4, Equivalência espectro: H4	2,915E+09	41,640	0,364	77,466	0,000	635,351	4,657
T4, JAE (1995)	3,804E+06	157,176	0,710	407,580	0,000	0,829	0,006
Valores de cálculo		-6,453	0,701	113,799			

Assim, pode afirmar-se que a metodologia do espectro de tráfego é sempre preferível desde que haja informação disponível que permita a aplicação do mesmo, sendo que o ideal seria a definição de espectro de tráfego de eixos por classe de tráfego.

2.9.2 Temperatura equivalente mensal versus temperatura equivalente anual

Nesta secção realiza-se uma comparação entre a metodologia de dimensionamento baseada numa única temperatura equivalente anual do ar e a metodologia baseada em doze temperaturas

equivalentes mensais do ar. É de referir que em MnPave (2008) as temperaturas mensais agrupam-se em cinco grupos: outono, inverno, início de primavera, fim de primavera e verão. Adotaram-se as estruturas de pavimentos definidas em 2.9.1.

Admite-se uma velocidade de circulação dos veículos pesados de 50 km/h e que a estrada se localiza na região de Faro. As temperaturas de serviço nas misturas betuminosas são definidas com base na metodologia Shell (2.4.1) a meia camada. Admite-se que o eixo-padrão equivalente é o eixo de 130 kN, quer nos pavimentos flexíveis, quer nos pavimentos semi-rígidos. Os módulos de deformabilidade das misturas betuminosas foram calculados com base na metodologia da UN (2.6.1.1.3).

Na verificação estrutural adotou-se somente a metodologia do eixo padrão para o número de passagens dado pela aplicação da metodologia da JAE (1995). Tal como no ponto interior, adotou-se o eixo de 130 kN. Admite-se que o número de passagens no horizonte de projeto é distribuído de forma uniforme nos vários meses do ano.

Tabela 2.27 – Verificação estrutural para o pavimento tipo SF1 – Temperatura mensal versus anual

a) Temperatura mensal

Mês	Nº de passagens no horizonte de projeto	Misturas betuminosas (MB)	Misturas betuminosas (MB)	Solo de fundação (SF)	Dano	
		Módulo de deformabilidade (MPa)	Extensão horizontal ($\times 10^{-6}$) (cálculo)	Extensão vertical ($\times 10^{-6}$) (cálculo)	MB	SF
Janeiro	2,598E+05	9800	106,479	263,152	0,041	0,013
Fevereiro	2,598E+05	9000	111,771	270,365	0,045	0,017
Março	2,598E+05	7300	125,484	288,374	0,055	0,020
Abril	2,598E+05	6400	134,705	300,599	0,062	0,028
Mai	2,598E+05	4800	155,113	325,460	0,075	0,046
Junho	2,598E+05	2900	193,365	368,537	0,091	0,064
Julho	2,598E+05	2000	220,902	400,365	0,091	0,064
Agosto	2,598E+05	2000	220,902	400,365	0,091	0,049
Setembro	2,598E+05	2700	198,852	374,626	0,092	0,031
Outubro	2,598E+05	4200	164,529	335,773	0,079	0,019
Novembro	2,598E+05	6700	131,536	296,625	0,060	0,014
Dezembro	2,598E+05	8600	114,734	274,407	0,047	0,000
Lei de Miner					0,829	0,365

b) Temperatura anual

Classe de tráfego	Nº de passagens no horizonte de projeto (Eixo padrão de 130 kN)	Misturas betuminosas (MB)	Solo de fundação (SF)	Dano	
		Extensão horizontal ($\times 10^{-6}$) (admissível)	Extensão vertical ($\times 10^{-6}$) (admissível)	MB	SF
T4, JAE (1995)	3,117E+06	163,564	428,389	0,938	0,366
Valores de cálculo		161,481	333,279		

Tabela 2.28 – Verificação estrutural para o pavimento tipo SF2 – Temperatura mensal versus anual

a) Temperatura mensal equivalente

Mês	Nº de passagens no horizonte de projeto	Misturas betuminosas (MB)	Misturas betuminosas (MB)	Solo de fundação (SF)	Dano	
		Módulo de deformabilidade (MPa)	Extensão horizontal ($\times 10^{-6}$) (cálculo)	Extensão vertical ($\times 10^{-6}$) (cálculo)	MB	SF
Janeiro	2,598E+05	9900	97,904	276,958	0,028	0,015
Fevereiro	2,598E+05	9100	103,681	287,225	0,032	0,017
Março	2,598E+05	7500	118,191	312,500	0,043	0,024
Abril	2,598E+05	6500	129,664	331,191	0,053	0,030
Mai	2,598E+05	4900	154,503	369,427	0,076	0,046
Junho	2,598E+05	3100	200,741	437,115	0,124	0,090
Julho	2,598E+05	2100	241,826	491,866	0,155	0,145
Agosto	2,598E+05	2200	238,008	490,210	0,156	0,143
Setembro	2,598E+05	2900	207,872	447,184	0,130	0,099
Outubro	2,598E+05	4400	164,690	384,421	0,086	0,054
Novembro	2,598E+05	6800	125,965	325,246	0,049	0,028
Dezembro	2,598E+05	8700	106,868	292,776	0,034	0,018
Lei de Miner					0,966	0,709

b) Temperatura anual equivalente

Classe de tráfego	Nº de passagens no horizonte de projeto (Eixo padrão de 130 kN)	Misturas betuminosas (MB)	Solo de fundação (SF)	Dano	
		Extensão horizontal ($\times 10^{-6}$) (admissível)	Extensão vertical ($\times 10^{-6}$) (admissível)	MB	SF
T4, JAE (1995)	3,117E+06	162,246	428,389	1,009	0,627
Valores de cálculo		162,532	381,272		

Tabela 2.29 – Verificação estrutural para o pavimento tipo SF3 – Temperatura mensal versus anual

a) Temperatura mensal equivalente

Mês	Nº de passagens no horizonte de projeto	Misturas betuminosas (MB)	Misturas betuminosas (MB)	Solo-Cimento (SC)	Solo de fundação (SF)	Dano		
		Módulo de deformabilidade (MPa)	Extensão horizontal ($\times 10^{-6}$) (cálculo)	Tensão horizontal (MPa) (cálculo)	Extensão vertical ($\times 10^{-6}$) (cálculo)	MB	SC	SF
Janeiro	3,170E+05	9800	54,517	0,274	250,001	0,002	0,006	0,012
Fevereiro	3,170E+05	9000	55,439	0,280	255,422	0,002	0,007	0,013
Março	3,170E+05	7300	57,157	0,295	269,037	0,001	0,013	0,016
Abril	3,170E+05	6400	57,704	0,305	278,432	0,001	0,020	0,018
Mai	3,170E+05	4800	57,443	0,325	297,825	0,001	0,044	0,024
Junho	3,170E+05	2900	50,613	0,360	334,418	0,000	0,178	0,038
Julho	3,170E+05	2000	39,391	0,387	365,109	0,000	0,516	0,054
Agosto	3,170E+05	2000	39,391	0,387	365,109	0,000	0,516	0,054
Setembro	3,170E+05	2700	48,885	0,365	340,026	0,000	0,217	0,040
Outubro	3,170E+05	4200	56,626	0,334	306,198	0,000	0,062	0,027
Novembro	3,170E+05	6700	57,545	0,302	275,395	0,001	0,017	0,017
Dezembro	3,170E+05	8600	55,875	0,283	258,525	0,002	0,008	0,013
Lei de Miner						0,010	1,604	0,326

b) Temperatura anual equivalente

Classe de tráfego	Nº de passagens no horizonte de projeto (Eixo padrão de 130 kN)	Misturas betuminosas (MB)	Solo cimento (SC)	Solo de fundação (SF)	Dano		
		Extensão horizontal ($\times 10^{-6}$) (admissível)	tensão horizontal (MPa) (admissível)	Extensão vertical ($\times 10^{-6}$) (admissível)	MB	SC	SF
T4, JAE (1995)	3,804E+06	157,176	0,341	407,580	0,006	0,687	0,310
Valores de cálculo		56,797	0,332	304,241			

Tabela 2.30 – Verificação estrutural para o pavimento tipo SR1 – Temperatura mensal versus anual

a) Temperatura mensal equivalente

Mês	Nº de passagens no horizonte de projeto	Misturas betuminosas (MB) Módulo de deformabilidade (MPa)	Misturas betuminosas (MB) Extensão horizontal ($\times 10^{-6}$) (cálculo)	Solo-Cimento (SC) Tensão horizontal (MPa) (cálculo)	Solo de fundação (SF) Extensão vertical ($\times 10^{-6}$) (cálculo)	Dano MB	Dano SC	Dano SF
Janeiro	3,170E+05	9800	1,773	0,586	88,269	0,000	0,008	0,000
Fevereiro	3,170E+05	9100	0,994	0,596	90,526	0,000	0,009	0,000
Março	3,170E+05	7400	-1,227	0,624	96,574	0,000	0,016	0,000
Abril	3,170E+05	6400	-2,695	0,644	101,112	0,000	0,023	0,000
Maio	3,170E+05	4900	-5,442	0,686	110,538	0,000	0,052	0,000
Junho	3,170E+05	3000	-10,888	0,765	128,644	0,000	0,240	0,001
Julho	3,170E+05	2100	-14,985	0,824	142,212	0,000	0,741	0,001
Agosto	3,170E+05	2100	-14,985	0,824	142,212	0,000	0,741	0,001
Setembro	3,170E+05	2800	-11,577	0,775	130,849	0,000	0,289	0,001
Outubro	3,170E+05	4300	-6,699	0,704	114,616	0,000	0,074	0,001
Novembro	3,170E+05	6700	-2,272	0,638	99,655	0,000	0,021	0,000
Dezembro	3,170E+05	8700	0,535	0,602	91,798	0,000	0,010	0,000
Lei de Miner						0,000	2,224	0,005

b) Temperatura anual equivalente

Classe de tráfego	Nº de passagens no horizonte de projeto (Exo padrão de 130 kN)	Misturas betuminosas (MB) Extensão horizontal ($\times 10^{-6}$) (admissível)	Solo cimento (SC) tensão horizontal (MPa) (admissível)	Solo de fundação (SF) Extensão vertical ($\times 10^{-6}$) (admissível)	Dano MB	Dano SC	Dano SF
T4, JAE (1995)	3,804E+06	157,176	0,710	407,580	0,000	0,829	0,006
Valores de cálculo		-6,453	0,701	113,799			

Da análise das Tabelas 2.28, 2.29 e 2.30 verifica-se, conforme esperado, que para estruturas de pavimento flexível, com camadas de base e sub-base granular, os valores de dano obtidos são equivalentes entre a metodologia SHELL (1978), para uma temperatura anual ponderada equivalente do ar e a metodologia com base na análise mensal da temperatura mensal média do ar. É de referir que a metodologia SHELL (1978) tem por base estudos semelhantes ao apresentado e que levaram à definição da Figura 2.2. No entanto, para modelos estruturais com materiais com ligantes hidráulicos verifica-se que uma análise mensal conduz a valores de dano, em especial na base das camadas com ligantes hidráulicos, muito mais elevados, pois tal como referido anteriormente, o número de ciclos admissível é muito sensível ao valor de cálculo.

2.9.3 Previsão do módulo de deformabilidade: Método UN versus fórmula de Witczak

Nesta secção realiza-se uma comparação entre as metodologias de definição dos módulos de deformabilidade das misturas betuminosas, calculados com base na metodologia da UN (2.6.1.1.3) e calculados com base na equação de Witczak (2.6.1.2). Compara-se ainda, para os módulos de deformabilidade calculados com a equação de Witczak a metodologia de dimensionamento baseada numa única temperatura equivalente anual do ar e a metodologia baseada em doze temperaturas equivalentes mensais do ar. Adotam-se as estruturas de pavimentos definidas em 2.9.1.

Na Figura 2.11 apresentam-se os módulos de deformabilidade das misturas betuminosas calculados com base na equação de Witczak para a temperatura anual equivalente do ar calculada com base na metodologia Shell.

Admite-se uma velocidade de circulação dos veículos pesados de 50 km/h e que a estrada se localiza na região de Faro. As temperaturas de serviço nas misturas betuminosas são definidas com base na metodologia Shell (2.4.1). Admite-se que o eixo-padrão equivalente é o eixo de 130 kN, quer nos pavimentos flexíveis, quer nos pavimentos semi-rígidos.

Na verificação estrutural adotou-se somente a metodologia do eixo padrão para o número de passagens dado pela aplicação da metodologia da JAE (1995). Tal como no ponto anterior, adotou-se o eixo de 130 kN. Admite-se que o número de passagens no horizonte de projeto é distribuído de forma uniforme nos vários meses do ano.

Camada	Designação	e (cm)	E (MPa)	v	Camada	Designação	e (cm)	E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa em camada de desgaste do tipo AC 14 surf 35/50 (BB)	5	3500	0,3	1	Mistura betuminosa em camada de desgaste do tipo AC 14 surf 35/50 (BB)	5	3500	0,3
2	Mistura betuminosa em camada de ligação do tipo AC 20 bin 35/50 (MB)	5	3500	0,3	2	Mistura betuminosa em camada de ligação do tipo AC 20 bin 35/50 (MB)	7	3500	0,3
3	Mistura betuminosa em camada de base do tipo AC 20 base 35/50 (MB)	6	3600	0,3	3	Mistura betuminosa em camada de base do tipo AC 20 base 35/50 (MB)	8	3700	0,3
4	Camada granular de base em ABGE	20	400	0,3	4	Camada granular de base em ABGE	20	260	0,3
5	Camada granular de sub-base em ABGE	20	200	0,3	5	Camada granular de sub-base em ABGE	20	125	0,3
6	Solo de fundação - Classe F3 do Macopav	∞	100	0,4	6	Solo de fundação - Classe F3 do Macopav	∞	60	0,4

a) F1 – Pavimento flexível

b) F2 – Pavimento flexível

Camada	Designação	e (cm)	E (MPa)	v	Camada	Designação	e (cm)	E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa em camada de desgaste do tipo AC 14 surf 35/50 (BB)	5	3500	0,3	1	Mistura betuminosa em camada de desgaste do tipo AC 14 surf 35/50 (BB)	5	3500	0,3
2	Mistura betuminosa em camada de ligação do tipo AC 20 bin 35/50 (MB)	5	3500	0,3	2	Mistura betuminosa em camada de ligação do tipo AC 20 bin 35/50 (MB)	6	3500	0,3
3	Mistura betuminosa em camada de base do tipo AC 20 base 35/50 (MB)	6	3600	0,3	3	Mistura betuminosa em camada de base do tipo AC 20 base 35/50 (MB)	7	3700	0,3
4	Camada em solo-cimento	20	2000	0,3	4	Camada em AGE	20	15000	0,2
5	Solo de fundação - Classe F3 do Macopav	∞	100	0,4	5	Camada granular de sub-base em ABGE	20	200	0,3
					6	Solo de fundação - Classe F3 do Macopav	∞	100	0,4

c) F3 – Pavimento flexível (camada estabilizada)

d) SR1 – Pavimento semi-rígido

Figura 2.11 – Modelo de análise para verificação estrutural – Metodologia de Witczak

2 Dimensionamento de pavimentos rodoviários: Experiência Portuguesa

Tabela 2.31 – Verificação estrutural para o pavimento tipo SF1 – Previsão do módulo de deformabilidade segundo Witczak

a) Temperatura mensal equivalente

Mês	Nº de passagens no horizonte de projeto	Misturas betuminosas (MB)	Misturas betuminosas (MB)	Solo de fundação (SF)	Dano	Dano
		Módulo de deformabilidade (MPa)	Extensão horizontal ($\times 10^{-6}$) (cálculo)	Extensão vertical ($\times 10^{-6}$) (cálculo)	MB	SF
Janeiro	2,598E+05	7000	127,773	289,407	0,056	0,019
Fevereiro	2,598E+05	6500	132,815	295,558	0,059	0,023
Março	2,598E+05	5400	145,633	310,573	0,067	0,026
Abril	2,598E+05	4800	153,986	320,100	0,072	0,032
Maio	2,598E+05	3900	169,137	338,093	0,079	0,044
Junho	2,598E+05	2800	194,568	364,224	0,088	0,052
Julho	2,598E+05	2300	209,608	381,279	0,090	0,052
Agosto	2,598E+05	2300	209,608	381,279	0,090	0,045
Setembro	2,598E+05	2700	197,332	367,043	0,088	0,035
Outubro	2,598E+05	3600	175,258	344,482	0,082	0,025
Novembro	2,598E+05	5000	151,185	317,071	0,071	0,020
Dezembro	2,598E+05	6200	136,069	299,464	0,062	0,000
Lei de Miner					0,904	0,373

b) Temperatura anual equivalente

Classe de tráfego	Nº de passagens no horizonte de projeto (Eixo padrão de 130 kN)	Misturas betuminosas (MB)	Solo de fundação (SF)	Dano	Dano
		Extensão horizontal ($\times 10^{-6}$) (admissível)	Extensão vertical ($\times 10^{-6}$) (admissível)	MB	SF
T4, JAE (1995)	3,117E+06	175,817	428,389	0,978	0,416
Valores de cálculo		175,028	344,079		

Tabela 2.32 – Verificação estrutural para o pavimento tipo SF2 – Previsão do módulo de deformabilidade segundo Witczak

a) Temperatura mensal equivalente

Mês	Nº de passagens no horizonte de projeto	Misturas betuminosas (MB)	Misturas betuminosas (MB)	Solo de fundação (SF)	Dano	Dano
		Módulo de deformabilidade (MPa)	Extensão horizontal ($\times 10^{-6}$) (cálculo)	Extensão vertical ($\times 10^{-6}$) (cálculo)	MB	SF
Janeiro	2,598E+05	7900	115,431	311,394	0,042	0,026
Fevereiro	2,598E+05	7400	120,469	319,717	0,046	0,034
Março	2,598E+05	6200	134,946	343,268	0,059	0,040
Abril	2,598E+05	5500	144,816	357,388	0,068	0,055
Maio	2,598E+05	4400	164,991	386,206	0,087	0,085
Junho	2,598E+05	3200	196,736	430,306	0,118	0,109
Julho	2,598E+05	2600	218,236	458,230	0,137	0,108
Agosto	2,598E+05	2700	215,208	456,739	0,136	0,089
Setembro	2,598E+05	3100	200,078	434,960	0,122	0,063
Outubro	2,598E+05	4100	172,560	398,751	0,096	0,039
Novembro	2,598E+05	5700	141,913	353,563	0,065	0,028
Dezembro	2,598E+05	7100	123,806	325,389	0,049	0,000
Lei de Miner					1,025	0,676

b) Temperatura anual equivalente

Classe de tráfego	Nº de passagens no horizonte de projeto (Eixo padrão de 130 kN)	Misturas betuminosas (MB)	Solo de fundação (SF)	Dano	
		Extensão horizontal ($\times 10^{-6}$) (admissível)	Extensão vertical ($\times 10^{-6}$) (admissível)	MB	SF
T4, JAE (1995)	3,117E+06	174,091	428,389	1,169	0,764
Valores de cálculo		179,616	400,456		

Tabela 2.33 – Verificação estrutural para o pavimento tipo SF3 – Previsão do módulo de deformabilidade segundo Witczak

a) Temperatura mensal equivalente

Mês	Nº de passagens no horizonte de projeto	Misturas betuminosas (MB)	Misturas betuminosas (MB)	Solo-Cimento (SC)	Solo de fundação (SF)	Dano		
		Módulo de deformabilidade (MPa)	Extensão horizontal ($\times 10^{-6}$) (cálculo)	Tensão horizontal (MPa) (cálculo)	Extensão vertical ($\times 10^{-6}$) (cálculo)	MB	SC	SF
Janeiro	3,170E+05	7000	57,510	0,296	269,716	0,001	0,014	0,016
Fevereiro	3,170E+05	6500	57,871	0,301	274,396	0,001	0,017	0,017
Março	3,170E+05	5400	58,254	0,313	285,885	0,001	0,028	0,020
Abril	3,170E+05	4800	58,030	0,321	293,377	0,001	0,037	0,022
Mai	3,170E+05	3900	56,439	0,336	308,117	0,000	0,067	0,027
Junho	3,170E+05	2800	51,260	0,357	331,036	0,000	0,159	0,036
Julho	3,170E+05	2300	45,979	0,371	347,056	0,000	0,280	0,044
Agosto	3,170E+05	2300	45,979	0,371	347,056	0,000	0,280	0,044
Setembro	3,170E+05	2700	50,462	0,359	333,655	0,000	0,175	0,037
Outubro	3,170E+05	3600	55,523	0,341	313,515	0,000	0,083	0,029
Novembro	3,170E+05	5000	58,099	0,319	291,070	0,001	0,034	0,022
Dezembro	3,170E+05	6200	58,037	0,304	277,384	0,001	0,019	0,018
Lei de Miner						0,006	1,193	0,332

b) Temperatura anual equivalente

Classe de tráfego	Nº de passagens no horizonte de projeto (Eixo padrão de 130 kN)	Misturas betuminosas (MB)	Solo cimento (SC)	Solo de fundação (SF)	Dano		
		Extensão horizontal ($\times 10^{-6}$) (admissível)	tensão horizontal (MPa) (admissível)	Extensão vertical ($\times 10^{-6}$) (admissível)	MB	SC	SF
T4, JAE (1995)	3,804E+06	168,951	0,341	407,580	0,004	0,976	0,348
Valores de cálculo		55,647	0,340	313,043			

Tabela 2.34 – Verificação estrutural para o pavimento tipo SR1 – Previsão do módulo de deformabilidade segundo Witczak

a) Temperatura mensal equivalente

Mês	Nº de passagens no horizonte de projeto	Misturas betuminosas (MB)	Misturas betuminosas (MB)	Solo-Cimento (SC)	Solo de fundação (SF)	Dano		
		Módulo de deformabilidade (MPa)	Extensão horizontal ($\times 10^{-6}$) (cálculo)	Tensão horizontal (MPa) (cálculo)	Extensão vertical ($\times 10^{-6}$) (cálculo)	MB	SC	SF
Janeiro	3,170E+05	7000	0,000	0,627	97,220	0,000	0,017	0,000
Fevereiro	3,170E+05	6500	0,000	0,637	99,456	0,000	0,020	0,000
Março	3,170E+05	5500	0,000	0,662	104,920	0,000	0,033	0,000
Abril	3,170E+05	4900	0,000	0,679	108,700	0,000	0,045	0,000
Mai	3,170E+05	3900	0,000	0,713	116,433	0,000	0,088	0,001
Junho	3,170E+05	2900	0,000	0,762	127,615	0,000	0,226	0,001
Julho	3,170E+05	2300	0,000	0,797	135,443	0,000	0,440	0,001
Agosto	3,170E+05	2300	0,000	0,797	135,443	0,000	0,440	0,001
Setembro	3,170E+05	2800	0,000	0,766	128,480	0,000	0,244	0,001
Outubro	3,170E+05	3600	0,000	0,725	119,207	0,000	0,111	0,001
Novembro	3,170E+05	5000	0,000	0,675	107,769	0,000	0,042	0,000
Dezembro	3,170E+05	6300	0,000	0,642	100,620	0,000	0,023	0,000
Lei de Miner						0,000	1,729	0,006

b) Temperatura anual equivalente

Classe de tráfego	Nº de passagens no horizonte de projeto (Eixo padrão de 130 kN)	Misturas betuminosas (MB)	Solo cimento (SC)	Solo de fundação (SF)	Dano		
		Extensão horizontal ($\times 10^{-6}$) (admissível)	tensão horizontal (MPa) (admissível)	Extensão vertical ($\times 10^{-6}$) (admissível)	MB	SC	SF
T4, JAE (1995)	3,804E+06	167,292	0,710	407,580	0,000	1,265	0,007
	Valores de cálculo	-8,009	0,723	118,616			

Comparando os resultados obtidos com a previsão do módulo de deformabilidade com base na equação de Witczak, AASHTO (2008) (Tabelas 2.31 a 2.34) com os resultados obtidos com a metodologia da UN (Tabelas 2.28 a 2.30) verifica-se que os valores de dano obtidos são da mesma ordem de grandeza, sendo ligeiramente mais altos com base na equação de Witczak, dado os módulos de deformabilidade das misturas betuminosas serem ligeiramente mais baixos. Tal como anteriormente indicado, os valores de módulo de deformabilidade previstos com a fórmula de Witczak, nos meses mais quentes são mais próximos da metodologia UN e nos meses mais frios são mais afastados da metodologia UN.

Tal como em 2.9.2, para estruturas de pavimento flexível com camada de base e sub-base granular, os valores de dano obtidos são equivalentes entre a metodologia SHELL (1978) com base numa temperatura anual ponderada equivalente do ar e a metodologia com base na análise mensal com a temperatura mensal média do ar. Para modelos estruturais com materiais com ligantes hidráulicos verifica-se que uma análise mensal conduz a valores de dano, em especial na base das camadas com ligantes hidráulicos mais elevados, pois tal como referido anteriormente o número de ciclos admissíveis é muito sensível ao valor de cálculo. Embora os módulos de deformabilidade nos meses quentes não sejam tão baixos como os previstos pela metodologia UN, a diferença não é tão significativa como a obtida em 2.9.2.

2.10 Conclusões

O método de dimensionamento empírico-mecanicista de pavimentos rodoviários flexíveis e semi-rígidos novos, usualmente aceite em Portugal é apresentado, sendo dado especial relevo à consideração do espectro de tráfego e ao cálculo dos módulos de deformabilidade das estruturas de pavimento em misturas betuminosas, incluindo a possibilidade do dimensionamento por valores de temperatura mensais.

Dos exemplos apresentados, pode concluir-se que sempre que for possível, mesmo no dimensionamento de pavimentos flexíveis com base e sub-base granular, deve considerar-se o espectro de tráfego, pois o mesmo conduz a valores mais conservativos, nomeadamente para o critério de dimensionamento relativo à deformação permanente. Em pavimentos semi-rígidos ou com camada de base ou sub-base com ligantes hidráulicos, a necessidade de se adotar o espectro de tráfego é ainda mais relevante, dada a sensibilidade das camadas executadas com ligantes hidráulicos ao valor da tensão de cálculo na base das mesmas. Nestes casos, o critério de equivalência entre eixos usualmente adotado na definição do número de eixos padrão equivalente pode conduzir a valores muito diferentes. Um raciocínio idêntico realizou-se para a

verificar a influência de considerar o valor mensal da temperatura do ar em vez de considerar o valor anual da temperatura do ar. Para os casos de pavimentos do tipo flexível, com camadas com ligantes hidráulicos ou pavimentos do tipo semi-rígido, é relevante a consideração dos valores de temperatura mensal. Relativamente a pavimentos flexíveis com camada de base e sub-base granular esta consideração não é tão relevante dado a temperatura equivalente ponderada do ar já ter em conta o efeito de variação mensal nas misturas betuminosas.

Por fim, verifica-se que as novas abordagens de cálculo do módulo de deformabilidade em misturas betuminosas são, para os exemplos abordados, relativamente mais conservadoras que as expressões usualmente adotadas. No entanto os valores de dano estrutural são geralmente da mesma ordem de grandeza.

3 Manual de dimensionamento de pavimentos rodoviários da África do Sul (SAPEM)

3.1 Considerações gerais

O manual de dimensionamento de pavimentos rodoviários da África do Sul (SAPEM, 2014) é um manual bastante completo, com 14 capítulos, escrito de forma didática e que aborda uma vasta temática no âmbito da engenharia de pavimentos, nomeadamente:

- Resumo histórico do desenvolvimento da engenharia de pavimentos, abordando os vários tipos de estruturas de pavimento e realizando um resumo dos princípios básicos da mecânica dos materiais aplicados à engenharia de pavimentos;
- Descrição dos métodos laboratoriais adotados na engenharia de pavimentos e dos cuidados a ter com os equipamentos;
- Caracterização dos materiais de pavimentação;
- Metodologias de prospeção;
- Critérios e metodologias de dimensionamento;
- Exigências e métodos construtivos;
- Exigências de aceitação e medidas de controlo de qualidade;
- Monitorização de pavimentos, estratégia de ciclos de vida com medidas de reabilitação periódicas.

De seguida, procede-se a uma análise comparativa sistemática entre o dimensionamento de pavimentos rodoviários em Portugal e na África do Sul, com especial ênfase nos critérios de dimensionamento e nos materiais de pavimentação (capítulos 9 e 10).

O dimensionamento de pavimentos flexíveis na África do Sul adota uma metodologia de dimensionamento empírico-mecanicista (SAMDM), sendo a metodologia de dimensionamento atual muito próxima da proposta por Theyse et al. (1996), que serviu por base ao catálogo de pavimentos da TRH4 (1996) para a África do Sul, que por sua vez foi considerado na elaboração do catálogo SATCC (CSIR, 1998) em vigor em vários países da África Austral.

3.2 Período de dimensionamento

No manual Sul-africano as estradas são classificadas de acordo com a sua importância e nível de serviço que se pretende que atinjam, ver Tabela 3.1. O período de dimensionamento é então definido de acordo com a categoria da estrada. Assim, para estradas da categoria A, é recomendado a adoção de um período de dimensionamento entre 15 a 30 anos, indicando-se o valor de 25 anos como ideal. Como pressupostos para o período de dimensionamento, em estradas da categoria A, há a garantia que a geometria será mantida por um longo período e que

não são aceites intervenções de reabilitação profundas dado o custo económico associado ao encerramento da via ser demasiado alto.

Para estradas da categoria B, é recomendada a adoção de um período de dimensionamento entre 15 a 25 anos, indicando-se o valor de 20 anos como ideal. Nesta categoria poderá haver uma alteração de geometria de modo a permitir maior tráfego. Poderá ainda existir uma falha nos pressupostos do projeto e/ou falta de investimento inicial para o realizar de forma conveniente. Em estradas de categoria C, a falta de verbas para o investimento inicial pode levar a que se adote um período de dimensionamento de 10 anos. Caso se preveja que a falta de investimento aconteça numa fase posterior para as operações de manutenção adequadas pode adotar-se um período de dimensionamento de 20 anos.

As estradas da categoria D são estradas com muito pouco volume de tráfego. Nestas, o crescimento do tráfego é imprevisível e pode ocorrer de forma muito intensa. Devem adotar-se estratégias que se traduzam nos ciclos vida e que se adaptem as estas imprevisibilidades. É de referir ainda que ao se adotar um nível de confiança aproximado de 50%, está implícito que metade do pavimento pode não apresentar condições de segurança e conforto no fim do seu período de dimensionamento. Para estas estradas, o período de dimensionamento é escolhido pelo projetista com base nos vários condicionalismos anteriormente apontados.

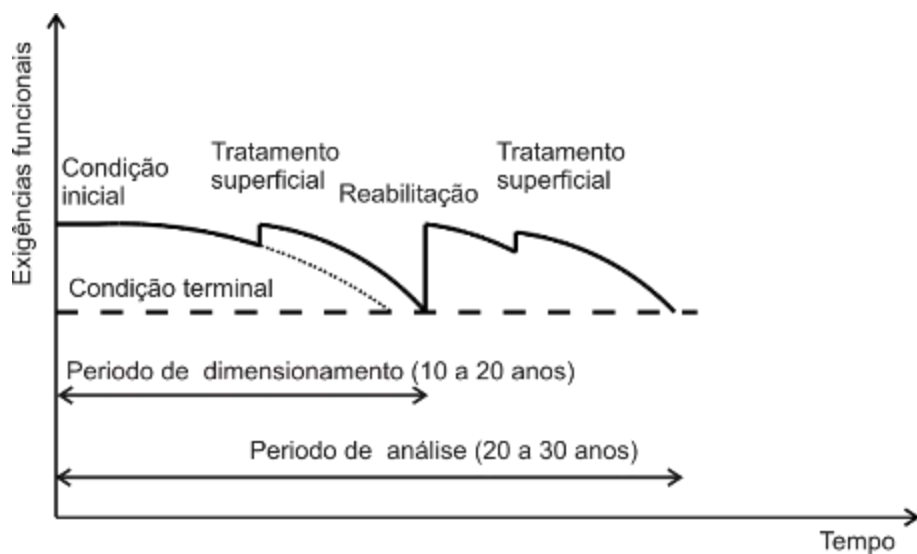
Tabela 3.1 – Categorias de estrada, SAPEM (SANRAL, 2014)

Descrição	Categoria			
	A	B	C	D
	Auto-estradas e Itinerários principais	Via coletoras e estradas rurais	Estradas rurais de tráfego baixo e caminhos estratégicos	Estradas de acesso rural
Importância	Muito importante	Importante	Pouco importante	Pouco importante
Nível de serviço	Muito alto	alto	moderado	moderado
Nível de confiança aproximado (%)	95	90	80	50 ¹
Extensão de estrada que excede as condições limite após o período de dimensionamento (%)	5	10	20	50
Nº de passagens no horizonte de projeto em eixo padrão de 80 kN (x10 ⁶)	3 a 100 em 20 anos	0,3 a 10 dependendo da estratégia de dimensionamento	< 3 dependendo da estratégia de dimensionamento	< 1 dependendo da estratégia de dimensionamento
Classe de tráfego	ES 10 a ES 100	ES 1 a ES 10	ES 0,03 a ES 3	ES 0,003 a ES 1
Tráfego diário, incluindo veículos ligeiros	> 4000	600 a 10000	< 600	< 500
Índice IRI				
Construção	2,4 a 1,6	2,9 a 1,6	3,5 a 2,4	4,2 a 2,4
Terminal	3,5	4,2	4,5	5,1
Cavados de rodeira em pavimentos flexíveis (mm)				
Aviso	10	10	10	10
Terminal	20	20	20	20

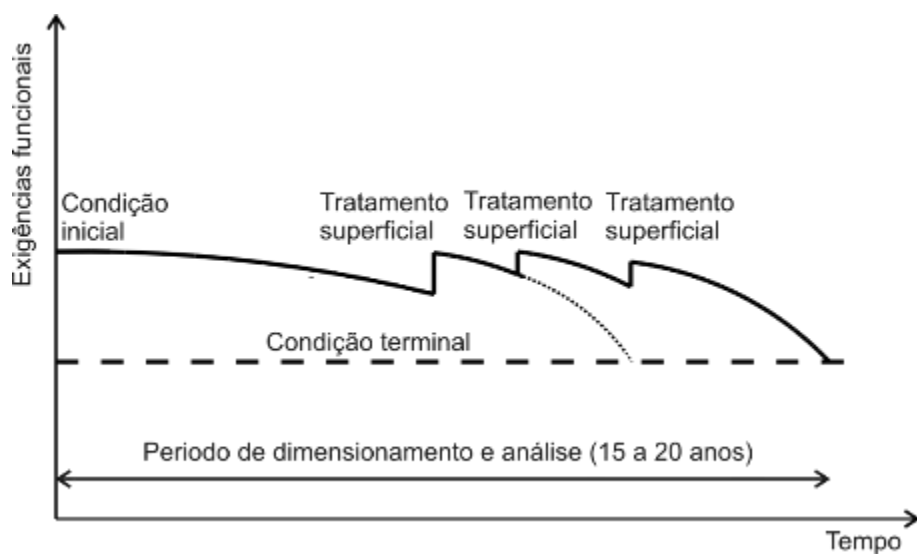
¹ O valor de 50% significa que se está a projetar para uma situação média

3.3 Estratégias de ciclos de vida

Em engenharia de pavimentos procura-se a solução estrutural mais económica que confira ao pavimento capacidade estrutural adequada. No manual são indicadas duas possíveis estratégias de ciclos de vida a adotar no dimensionamento de pavimentos flexíveis novos, essas estratégias são apresentadas na Figura 3.1.



a) Investimento inicial reduzido



b) Investimento reduzido para reparações futuras

Figura 3.1 – Estratégias de ciclos de vida possíveis para uma nova estrutura de pavimento flexível

3.4 Tráfego

3.4.1 Caracterização do tráfego

O manual SAPEM (SANRAL, 2014) indica que na África do Sul o documento principal que rege a definição do tráfego é o TRH16 (1991). Tal como em JAE (1995), o manual SAPEM (SANRAL, 2014) indica que o dimensionamento dos pavimentos rodoviários deve ser realizado para o

volume de tráfego correspondente aos veículos pesados. As características dos limites legais por eixo dos veículos pesados a circular na África do Sul são as indicadas na Tabela 3.2.


Tabela 3.2 – Limites legais de carga por eixo, SAPEM (SANRAL, 2014)

Veículo pesado	Eixo	Rodado	Carga por eixo (ton)	
			Antes de 1996	Após 1996
Camiões	eixo de direção	Simples	7,7	7,7
		Duplo	8,2	9,0
	Simples	Simples	7,7	8,0
		Duplo	16,4	18,0
	Tandem	Simples	15,4	16,0
		Duplo	21,0	24,0
	Tridem	Simples	21,0	24,0
Autocarros	eixo de direção	Simples	7,7	7,7
	Simples	Duplo	10,2	10,2

3.4.2 Eixo-Padrão equivalente (fator de agressividade)

No manual SAPEM (SANRAL, 2014) o eixo padrão equivalente é um eixo de 80 kN de rodado duplo com a configuração indicada na Tabela 3.3. Na mesma tabela indica-se igualmente o eixo-padrão anterior a 1996 adotado na definição do catálogo TRH4 (1996) com base no método empírico-mecanicista Sul-africano.

Tabela 3.3 – Eixos padrão tipo adotados no dimensionamento de pavimentos rodoviários na África do Sul

Eixo Padrão	R (m)	DR (m)	p (MPa)	Configuração (Planta)
80 kN (SAPEM, 2014)	0,09897	0,35	0,65	
80 kN (Theyse et al. 1996)	0,11065	0,35	0,52	

O número de passagens de um eixo equivalente ao eixo padrão é dado pela equação 2.1, sendo o expoente p definido com base nos valores indicados na Tabela 3.4 em função das camadas de base e sub-base adotadas na estrutura de pavimento.

Tabela 3.4 – Expoente β para conversão de passagens para o eixo padrão equivalente

Expoente recomendado para a conversão para eixos padrão equivalentes		
Pavimento		β
Base	Sub-base	
Granular	Granular	3 a 6 (4)
Granular	Cimento	2 a 4 (3)
Cimento *	Granular	4 a 10 (5)
Cimento #	Granular	3 a 6 (5)
Cimento *	Cimento *	3 a 6 (4 a 5)
Cimento #	Cimento #	2 a 5 (4 a 5)
material estabilizado com betume	Granular	2 a 6 (4)
Mistura Betuminosa	Cimento	2 a 5 (4)

* material não fendilhado

material fendilhado

De acordo com o manual SAPEM (SANRAL, 2014) o efeito do eixo ser duplo ou triplo não é tido em consideração na definição do número de passagens equivalentes ao eixo padrão de 80 kN. O número de passagens equivalentes é sobrestimado quando o efeito do tipo de eixo não é considerado, o que é igual a adotar um valor de k unitário na equação 2.2.

Em estradas com duas ou mais vias, o valor do tráfego médio diário anual de pesados por sentido é distribuído por cada via em função do número de vias por sentido, incluindo a zona de bermas pavimentadas ver Tabela 3.5. Na Tabela 3.6 apresentam-se as taxas de crescimento a adotar no dimensionamento dos pavimentos rodoviários.

No manual SAPEM (SANRAL, 2014) adota-se de forma simplificada o conceito de fator de agressividade médio que converte um número de veículos pesados diretamente num número de passagens equivalentes do eixo padrão, tal como adotado em JAE (1995). É introduzido igualmente o conceito de taxa de crescimento do FA, que tem em conta um possível aumento da carga dos veículos pesados a circular durante o período de dimensionamento.

A taxa de crescimento dos veículos pesados (i_h) e a taxa de crescimento do fator de agressividade (i_v), em valores decimais, são combinadas numa única taxa de crescimento a considerar na evolução do TMDA (i):

$$i = (1 + i_h)(1 + i_v) - 1 \quad (3.1)$$

Em que TMDA é o tráfego médio diário anual de veículos pesados no ano de abertura, por sentido e na via mais solicitada.

Tabela 3.5 – Distribuição do tráfego pesado por via, SAPEM (SANRAL, 2014)

Nº total de vias nos dois sentidos	Fator de distribuição lateral				
	Berma pavimentada (lenta)	Via 1	Via 2	Via 3	Berma pavimentada (rápida)
2	1,00	1,00	-	-	-
4	0,95	0,95	0,30	-	0,30
6	0,70	0,70	0,60	0,60	0,25

Tabela 3.6 – Taxas de crescimento de crescimento de tráfego, SAPEM (SANRAL, 2014)

Descrição da estrada e atividade económica	Taxa de crescimento (%)	
	Anterior a 2007	Posterior a 2007
Estradas principais que ligam centro com atividade económica elevada	9 a 19	6 a 10
Estradas que ligam centro com atividade económica moderada	6 a 8	4 a 7
Estradas que ligam centros com atividade económica estagnada	0,5 a 1,5	0 a 2

Tabela 3.7 – Valores de fator de agressividade (FA) e correspondente taxa de crescimento, SAPEM (SANRAL, 2014)

Controlo do limite legal de carga pelas forças policiais	Normal			Elevado
	Baixo SHV ¹ > 45%	Normal 20% ≤ SHV ≤ 45%	Elevado SHV < 20%	Todos os níveis
Tráfego de veículos pesados				
Classe de veículos pesados	Valores recomendados de FA			
SHV		0,5 a 1,5		0,4 a 0,8
MHV	1,0 a 4,0	2,0 a 5,0		1,0 a 3,0
LHV	1,5 a 4,5	3,5 a 6,0	4,5 a 7,0	3,0 a 5,0
Todos	0,8 a 2,8	2,0 a 4,5	3,0 a 5,0	2,0 a 3,0
Classe de veículos pesados	Valores recomendados de taxa de crescimento de FA			
SHV	0,0			
MHV	3,0	0,0		
LHV	5,0	2,0		
Todos	6,0	2,0		

SHV - veículos pesados de 1 e 2 eixos, MHV - veículos pesados de 3 e 4 eixos, LHV - veículos pesados de 5 ou mais eixos

O número de eixos padrão acumulado no período de dimensionamento a adotar no dimensionamento de pavimentos, de acordo com o SAPEM (SANRAL, 2014), é dado por:

$$N_{\text{Projeto}} = 365 AAE_{p} (1+i) \frac{(1+i)^p - 1}{i} \quad (3.2)$$

Em que p é o período de dimensionamento em anos e AAE_{p} é o tráfego médio diário equivalente ao eixo padrão de 80 kN no ano de abertura, dado por:

$$AADE_p = FA \times TMDA_p \quad (3.3)$$

Em que $TMDA_p$ é o tráfego médio diário anual de veículos pesados no ano de abertura na via analisada.

Na Tabela 3.8 apresentam-se as classes de tráfego e os correspondentes valores de referência de passagens de eixo-padrão equivalente de 80 kN adotadas no dimensionamento por catálogo do TRH4 (1996).

Tabela 3.8 – Classes de tráfego adotadas no TRH4 (1996) e correspondentes valores de referência de passagens de eixo-padrão equivalente de 80 kN

Classe	Eixo padrão equivalente de 80 kN	
	Min	Máximo
ES0.003	0	3×10^3
ES0.01	3×10^3	1×10^4
ES0.03	1×10^4	3×10^4
ES0.1	3×10^4	1×10^5
ES0.3	1×10^5	3×10^5
ES1	3×10^5	1×10^6
ES3	1×10^6	3×10^6
ES10	3×10^6	1×10^7
ES30	1×10^7	3×10^7
ES100	3×10^7	1×10^8

3.4.3 Espectro de tráfego

O manual SAPEM (SANRAL, 2014) possibilita a adoção do espectro de eixos de veículos pesados no dimensionamento de pavimentos rodoviários, adotando uma abordagem de dano incremental. Tal como indicado no manual, a abordagem mais simples passa pela aplicação da lei de Miner, que admite que a evolução do dano é linear durante o período de vida da estrutura; o valor de dano associado a cada eixo é calculado de forma independente partindo do pressuposto que a verificação estrutural é realizada para as propriedades iniciais. O manual aponta ainda para novas metodologias que adotam métodos recursivos, que têm em consideração a evolução do dano ao longo do período de vida das estruturas, AASHTO (2008).

Tal como indicado em 2.7.4, o dano associado a um dado eixo é o quociente entre o número de passagens de projeto ($N_{projeto}$), definido aquando da caracterização do tráfego e o número admissível de passagens ($N_{admissivel}$), definido com base na aplicação dos critérios de dimensionamento anteriormente definidos (é o mínimo valor admissível).

Em SAPEM (SANRAL, 2014) é igualmente referido que na grande maioria dos projetos de pavimentação o espectro de eixos de veículos pesados não é conhecido. Por esse motivo, a metodologia do eixo padrão equivalente continua a ser adotada.

3.5 Condições de fundação

A geologia e o clima da região são os fatores principais que determinam as características resistentes de deformabilidade dos solos de fundação. No manual SAPEM é introduzido o conceito de profundidade de prospeção do material de fundação, que não é mais do que a profundidade abaixo da futura superfície de pavimento nova que intersecta os materiais que irão influenciar o comportamento da estrutura de pavimento (ver Tabela 3.9). A profundidade de prospeção é definida em função da categoria da estrada, e é tanto maior quanto mais exigente é a estrada.

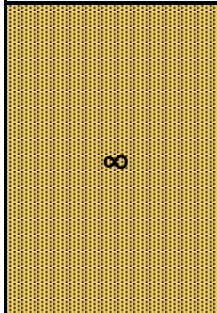
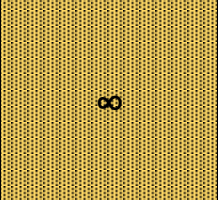

Tabela 3.9 – Profundidade de prospeção, SAPEM (SANRAL, 2014)

Profundidade do material	
Categoria	Profundidade (m)
95% (A)	1,0 a 1,2
90% (B)	0,8 a 1,0
80% (C)	0,8
50% (D)	0,7

As características do solo de fundação devem garantir um comportamento adequado da estrutura de pavimento a construir. De acordo com o manual SAPEM, em pavimentos flexíveis deve garantir-se que o solo de fundação tem um índice de CBR mínimo de 15%. O índice de CBR a adotar para uma dada região deve ser o percentil 10 da gama de valores obtida, isto é, 90% dos valores obtidos devem ser superiores ao valor adotado em projeto.

Assim, nas zonas em que o solo de fundação não garante um CBR mínimo de 15% o manual preconiza várias possibilidades de intervenção, por forma a garantir que a solução de fundação encontrada garanta os valores mínimos de CBR exigidos, ver Tabela 3.10.

Tabela 3.10 – Intervenções que garantem um solo de fundação com características resistentes mínimas, SAPEM (SANRAL, 2014)

Solo de fundação CBR > 15%	Solo de fundação CBR 7% a 15%	Solo de fundação CBR 3% a 7%	Solo de fundação CBR < 3%		
Secção	e (m)	Secção	e (m)	Secção	Secção
	0,15	CBR > 15%	0,15	CBR > 15%	Estabilização do solo ou substituição do solo por material de melhor qualidade ou adicionar solos de boa qualidade na espessura adequada
			0,15	CBR > 7%	
					

Na Tabela 3.11, apresentam-se os valores dos módulos de deformabilidade indicados para os solos de fundação de acordo com o SAPEM (SANRAL, 2014). Indicam-se igualmente os valores de módulo de deformabilidade indicados em Theyse et al. (1996) que, conforme referido anteriormente são referentes ao método empírico-mecanicista que o SAPEM (SANRAL, 2014) tem por base. O manual SAPEM (SANRAL, 2014) não indica valores de referência para o coeficiente de Poisson; no entanto, em Theyse et al. (1996) é indicado o valor de 0,35 para os materiais indicados na Tabela 3.11.

No SAPEM (SANRAL, 2014) é usual caracterizar o solo de fundação com base no valor numérico da classe de solo (GM), definido através da equação:

$$GM = \frac{\rho_{2.0 \text{ mm}} + \rho_{4.5 \text{ mm}} + \rho_{0.075 \text{ mm}}}{100} \quad (3.4)$$

Em que $\rho_{i \text{ mm}}$ é a percentagem retida no peneiro com dimensão i (mm).

Tabela 3.11 – Módulo de deformabilidade a adotar em solos de fundação

Classe de solo	Índice CBR (%)	SAPEM (2014)	Módulo da deformabilidade (MPa)	
			Theyse et al, (1996)	
			Condições secas	Condições húmidas
G7	≥ 15,0 a 93% *	120	30 a 200	20 a 120
G8	≥ 10,0 #	90	30 a 180	20 a 90
G9	≥ 7,0 #	70	30 a 140	20 a 70
G10	≥ 3,0 #	45	20 a 90	10 a 45

* valores de compactação relativa à densidade seca máxima obtida no ensaio AASHTO modificado

valores de CBR obtidos para a densidade insitu

3.6 Materiais de pavimentação

3.6.1 Materiais granulares

As propriedades dos materiais granulares dependem da capacidade de suporte das camadas inferiores. Quanto maior for a capacidade de suporte (rigidez da camada), maior será o módulo de deformabilidade a adotar na camada. Na Tabela 3.12 são apresentados os módulos de deformabilidade dos materiais granulares indicados em SAPEM (SANRAL, 2014), bem como o índice CBR associado. O SAPEM (SANRAL, 2014) introduz o conceito de camada equivalente a granular, que não é mais do que uma camada granular estabilizada com cimento onde ocorreu fendilhação generalizada após tempo de serviço e que passa a ter um comportamento próximo de uma camada granular. Tal como indicado no manual, a consistência de um material equivalente a granular não é igual à de um material granular, pois as fendas não são em geral visíveis.

É de referir ainda que os valores de módulo de deformabilidade indicados para camadas granulares partem do princípio que o pavimento flexível está bem dimensionado, isto é, que os materiais adotados garantem que o módulo de deformabilidade aumenta de forma suave em altura desde a camada do solo de fundação.

Tabela 3.12 – Módulo de deformabilidade a adotar em camadas em materiais granulares, SAPEM (SANRAL, 2014)

Módulos de deformabilidade para material granular					
Material	Índice CBR (%)	Tamanho máximo (mm)	Descrição	Condições de suporte	
				Sobre camada em cimento	Sobre camada granular
G1	-	37,5	material britado de excelente qualidade	250 – 1000 (450) ¹	150 – 600 (300)
G2	≥ 80,0 a 98% *	28,0	material britado	200 – 800 (400)	100 – 400 (250)
G3	≥ 80,0 a 98% *	28,0	material britado	200 – 800 (350)	100 – 350 (250)
G4	≥ 80,0 a 98% *	53,0	material natural (qualidade para camada de base)	100 – 600 (300)	75 – 350 (225)
G5	≥ 45,0 a 95% *	64,0	material natural	50 – 400 (250)	40 – 300 (200)
G6	≥ 25,0 a 93% *	64,0	material natural	50 – 200 (225)	30 – 200 (150)
EG4	-	-	Equivalente granular (Origem G5, G6)	-	200 – 400 (300)
EG5	-	-	Equivalente granular (Origem G7, G8)	-	100 – 300 (200)
EG6	-	-	Equivalente granular (Origem G9, G10)	-	30 – 200 (140)

¹ Valores entre parêntesis são os valores adotados na definição do catálogo de pavimentos THR4 (1996)

* valores de compactação relativos à densidade seca máxima obtida no ensaio AASHTO modificado

Em SAPEM (SANRAL, 2014) não são indicados valores de referência para o coeficiente de Poisson. No entanto em Theyse et al. (1996) é indicado o valor de 0,35 para os materiais indicados na Tabela 3.12.

3.6.2 Misturas betuminosas fabricadas a quente

O módulo de deformabilidade das misturas betuminosas indicado no SAPEM (SANRAL, 2014) é o definido na Tabela 3.13. O manual indica que se devem adotar valores de coeficiente de Poisson entre 0,40 a 0,44 em misturas betuminosas, sendo 0,44 o valor aconselhado. Não é indicado nenhuma metodologia de cálculo para a previsão do módulo de deformabilidade em misturas betuminosas, nem como deve ser considerada a influência da temperatura na sua definição, nem se indicam os valores de velocidade de circulação dos veículos pesados para as quais foram definidos os módulos de deformabilidade indicados.

Tabela 3.13 – Módulo de deformabilidade das misturas betuminosas, SAPEM (SANRAL, 2014)

Tipo	d - Profundidade da camada relativamente à superfície (mm)	E (MPa)
Mistura betuminosa descontínua em camada de desgaste	d ≤ 50	3000
	d ≤ 100	4000
Mistura betuminosa contínua	100 < d ≤ 150	5000
	150 < d ≤ 200	6000
	200 < d ≤ 250	7000

Em Theyse e Muthen (2000) são indicados valores de referência do módulo de deformabilidade de misturas betuminosas sugeridos por Freeme (1983) e por Jordan (1992), em função da temperatura de serviço de 20° (condições de inverno) e 40° C (condições de verão), refere-se ainda que os valores propostos por Freeme são aqueles que devem ser tido em consideração.

Tabela 3.14 – Módulo de deformabilidade das misturas betuminosas, Theysen e Mutten (2000)

a) Freeme (1983)

Tipo	d - Profundidade da camada relativamente à superfície (mm)	E (MPa)					
		Material em boas condições		Mistura rígida e seca		Mistura fendilhada	
		20° C	40° C	20° C	40° C	20° C	40° C
MB descontinua	d ≤ 50	4000	1500	5000	1800	1000	500
	100 < d ≤ 150	6000	3500	7000	4000	1000	500
	150 < d ≤ 250	7000	5500	8000	6000	1000	500
MB contínua	d ≤ 50	6000	2200	7000	4000	750	5000
	100 < d ≤ 150	8000	5500	9000	6000	1000	750
	150 < d ≤ 250	9000	7500	10000	8000	1000	750

b) Jordan (1992)

Tipo	d - Profundidade da camada relativamente à	E (MPa)					
		Material em boas		Mistura rígida e seca		Mistura fendilhada	
		20° C	40° C	20° C	40° C	20° C	40° C
MB descontinua	d ≤ 50	100	200	2000	300	600	200
	100 < d ≤ 150	2000	300	3000	400	750	300
	150 < d ≤ 250	3000	400	4000	500	800	400
MB contínua	d ≤ 50	2000	300	3000	300	750	300
	100 < d ≤ 150	4000	400	5000	600	800	400
	150 < d ≤ 250	6000	1000	7000	1500	1000	750

3.6.3 Materiais com ligantes hidráulicos

O SAPEM (SANRAL, 2014) considera ainda a possibilidade de se adotar em camadas de base e sub-base materiais granulares tratados com ligantes hidráulicos com as propriedades indicadas na Tabela 3.15.

Tabela 3.15 – Valores de referência das características mecânicas de solos estabilizados com cimento, SAPEM (SANRAL, 2014)

Classe inicial (não fendilhada)	E (MPa)	$\varepsilon_{\text{último}} (\times 10^{-6})$	σ_c (MPa)	R_{cd} (MPa)	Classe final (estado fendilhado)	E (MPa)
C3	2000	125	1,5 a 3,0 (2,25)	min de 0,25	EG4	300
C4	1500	145	0,75 a 1,5 (1,125)	min de 0,20	EG5	200

σ_c (MPa) - Tensão de compressão simples aos 7 dias para 100% da baridade máxima seca, R_{cd} (MPa) - Resistência à tração em compressão diametral

Em SAPEM (SANRAL, 2014) não são indicados valores de referência para o coeficiente de Poisson. No entanto, em Theyse et al. (1996) é indicado o valor de 0,35 para os materiais em

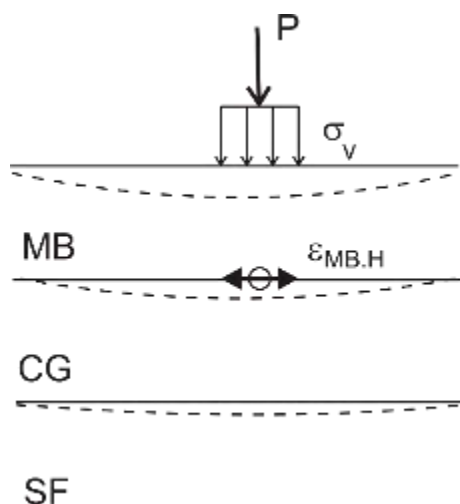
estado não fendilhado indicados na Tabela 3.14. Para os materiais em estado fendilhado (equivalentes a um granular) dever-se-á adotar igualmente um coeficiente de Poisson de 0,35.

Dado os valores de módulo de deformabilidade indicados e os valores de resistência aos 7 dias pode concluir-se que a camada estabilizada com cimento (C3) tem um comportamento próximo de um solo-cimento (Tabela 2.21). Em SAPEM (SANRAL, 2014) é igualmente indicado que os materiais em agregado britado estabilizado com ligantes hidráulicos (C1 e C2) com maiores dosagens de cimento deixaram de ser adotados dada a experiência na sua utilização ter passado por situações com elevada fendilhação e consequentemente reflexão de fendas.

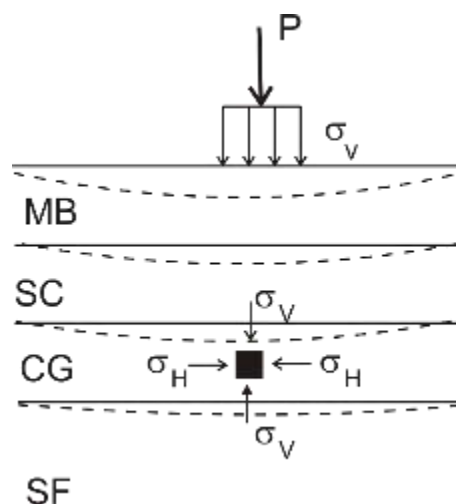
3.7 Critérios de dimensionamento

Os critérios de dimensionamento adotados no manual SAPEM (SANRAL, 2014) têm por base os critérios do modelo de dimensionamento empírico-mecanicista Sul-africano (SAMDM) proposto por Theyse et al. (1996). Assim, no SAMDM são propostos os seguintes critérios (ver Figura 3.2):

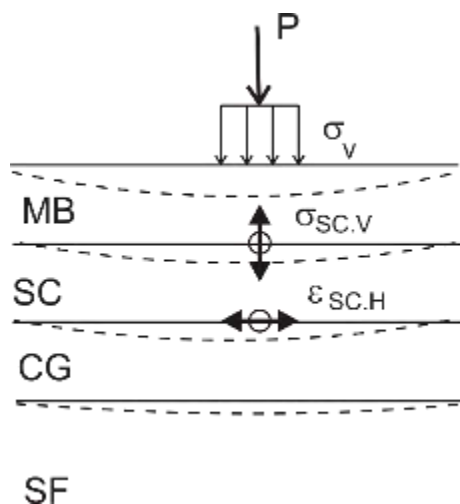
- Critério de fadiga em misturas betuminosas, controlado pela extensão horizontal de tração na base das camadas betuminosas, dado ser esta a zona geralmente mais tracionada. Definem-se critérios de fadiga diferentes para camadas espessas e para camadas delgadas;
- Critério de deformação permanente em materiais granulares, controlado pelas tensões principais a meio da camada granular. Note-se que este critério não é tido usualmente em consideração nos projetos de pavimentação em Portugal;
- Critério de fadiga em camadas estabilizadas com cimento, controlado pela extensão horizontal de tração na base dos materiais com ligantes hidráulicos, refira-se que o critério adotado em Portugal tem em conta o valor da tensão de tração na base;
- Critério de deformação permanente e esmagamento em camadas estabilizadas com cimento, controlado pela tensão vertical de compressão no topo dos materiais com ligantes hidráulicos, note-se que este critério não é tido usualmente em consideração nos projetos de pavimentação em Portugal;
- Critério de deformação permanente em solos de fundação, controlado pela extensão vertical de compressão no topo do solo de fundação.



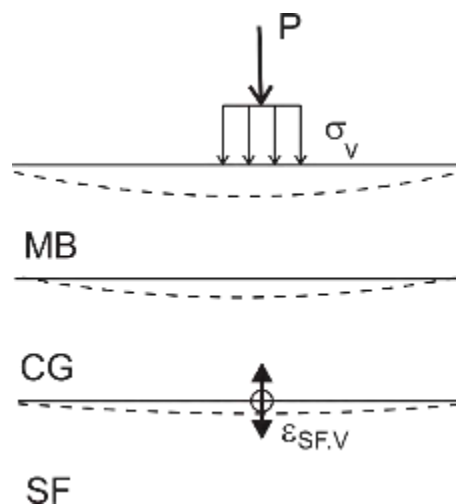
a) Fadiga nas misturas



b) Deformação permanente em camadas granulares



c) Fadiga, esmagamento e deformação permanente



d) Deformação permanente em solos de fundação

Figura 3.2 – Critérios de dimensionamento em função do tipo de material, de acordo com o SAMDM indicado em SAPEM (SANRAL, 2014)

3.7.1 Solos de fundação

O critério de dimensionamento do solo de fundação tem por objetivo limitar a ocorrência de excessivas deformações permanentes da fundação e o consequente aparecimento de cavados de rodeira à superfície do pavimento. São definidos dois critérios de dimensionamento distintos em função do valor de deformação permanente terminal admitida no topo do solo de fundação no fim do período de vida útil, 10 mm ou 20 mm. É de referir que o cavado de rodeira à superfície no fim do período de vida útil será muito provavelmente superior ao valor limite admitido no topo

do solo de fundação. É indicado que em estradas da categoria A e B deve ser adotado um valor terminal de 10 mm no solo de fundação.

O critério para a deformação permanente é função da extensão vertical no topo da camada do solo de fundação ($\varepsilon_{v.sf}$), sendo dado por:

$$N = 10^{(A - 10 \log(\varepsilon_{v.sf}))} \quad (3.5)$$

Sendo N o número de aplicações de carga do eixo padrão e A uma constante, dada em função da categoria da estrada e do valor terminal de deformação permanente (ver Tabela 3.16).

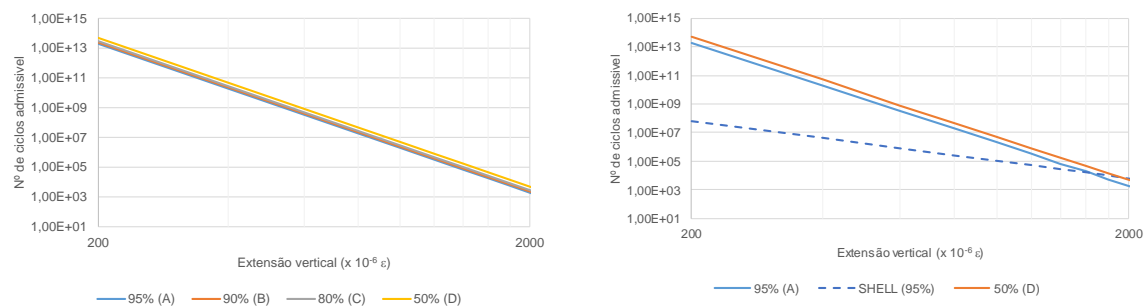
Na Figura 3.3 são apresentados graficamente os critérios de dimensionamento relativos ao controlo da deformação permanente em solos. Da análise da Figura 3.3 verifica-se que o critério mais condicionante é o relativo à categoria A e para uma deformação limite de 10 mm.

Verifica-se ainda que o critério Shell adotado no projeto de pavimentos em Portugal é mais condicionante que os critérios mais exigentes adotados no SAMDM, para extensões verticais inferiores a aproximadamente de 600×10^{-6} comparativamente ao critério adotado para a categoria A com base no valor limite de 10 mm, e para extensões inferiores aproximadamente de 1600×10^{-6} comparativamente ao critério adotado para a categoria A e 20 mm de valor limite.

Tabela 3.16 – Constante (A) para o critério de deformação permanente do solo de fundação, SAPEM (SANRAL, 2014)

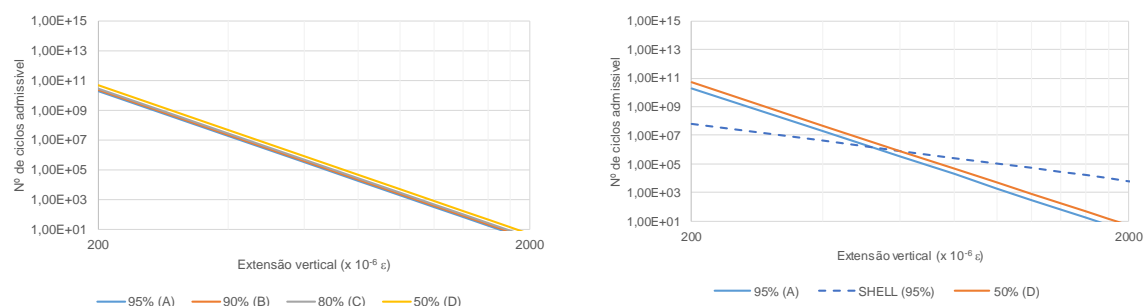
Categoria	Deformação permanente limite (A)	
	10 mm	20 mm
95% (A)	33,3	36,3
90% (B)	33,38	36,38
80% (C)	33,47	36,47
50% (D)	33,7	36,7

3 Manual de dimensionamento de pavimentos rodoviários da África do Sul (SAPEM)



a) Deformação permanente de 20 mm

b) Deformação permanente de 20 mm versus Shell



c) Deformação permanente de 10 mm

d) Deformação permanente de 10 mm versus Shell

Figura 3.3 – Critérios de dimensionamento para controlo da deformação permanente do solo de fundação SAPEM (SANRAL, 2014) e comparação com o critério de deformação permanente da Shell (1978)

3.7.2 Misturas betuminosas

O critério de dimensionamento das misturas betuminosas tem por objetivo limitar a ocorrência de fendilhamento por fadiga e o consequente aparecimento de fendas à superfície do pavimento, sendo definido em função da extensão horizontal na base da camada em misturas betuminosas ($\varepsilon_{t.mb}$) por:

$$N = SF \times 10^{\alpha \left(1 - \frac{\log(\varepsilon_{t.mb})}{\beta} \right)} \quad (3.6)$$

Sendo N o número de aplicações de carga do eixo padrão, α e β constantes, dadas em função da categoria da estrada, do tipo de misturas, da sua espessura e do módulo de deformabilidade das camadas de base (ver Tabela 3.17) e SF um fator de amplificação que tem em conta a espessura da camada em misturas betuminosas:

$$SF = \begin{cases} 1 & \text{se } e < 25 \text{ mm} \\ 0,0489 e - 0,2225 & \text{se } e \geq 25 \text{ mm} \end{cases} \quad (3.7)$$

Em que e é a espessura da camada em mm. Da equação 3.7 resulta que quanto mais espessa for a camada, maior é a resistência à propagação de fendas.

Tabela 3.17 – Constantes (α e β) para o critério de fadiga em misturas betuminosas, SAPEM (SANRAL, 2014)

a) Camadas de desgaste delgadas (< 50 mm)

Camada de desgaste - fina (< 50 mm)				
Nível de confiança	Mistura betuminosa continua		Mistura betuminosa descontinua	
	α	β	α	β
95% (A)	17,4	3,4	15,79	3,705
90% (B)	17,46	3,41	15,85	3,719
80% (C)	17,54	3,42	16,93	3,736
50% (D)	17,71	3,46	16,09	3,774

b) Camadas de base com espessura significativa (> 75 mm)

Camada de base - espessa (> 75 mm)										
Módulo de deformabilidade (MPa)										
Nível de confiança	1000		2000		3000		5000		8000	
	α	β	α	β	α	β	α	β	α	β
95% (A)	16,44	3,378	16,09	3,357	15,78	3,334	15,52	3,317	15,086	3,227
90% (B)	16,81	3,453	16,43	3,428	16,11	3,403	15,73	3,362	15,296	3,272
80% (C)	17,25	3,543	16,71	3,487	16,26	3,435	15,83	3,383	15,39	3,291
50% (D)	17,87	3,671	17,17	3,583	16,68	3,524	16,1	3,441	15,65	3,346

Na Figura 3.4 são apresentados graficamente os critérios de dimensionamento relativos ao controlo da fadiga em misturas betuminosas de desgaste delgadas, incluindo o critério da Shell usualmente adotado em Portugal para dois valores de módulo de deformabilidade. Adotou-se uma percentagem volumétrica de betume de 12%. Da análise da Figura 3.4 verifica-se que o critério para a categoria A, em camadas delgadas, é mais condicionante que o critério Shell para os valores de deformabilidade adotados.

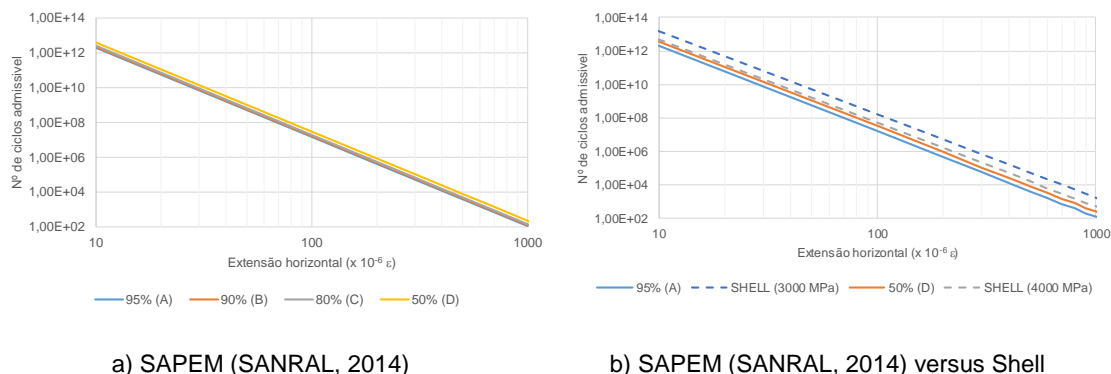
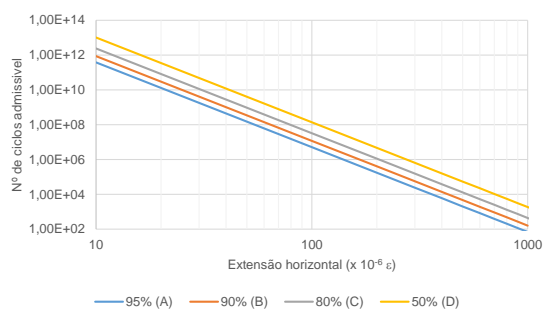
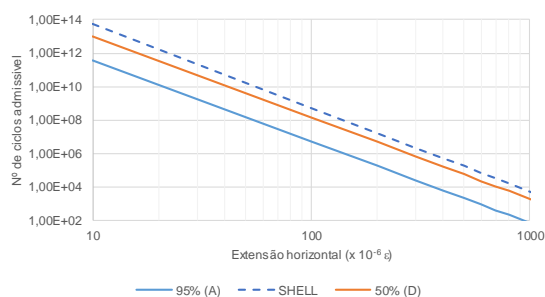


Figura 3.4 – Critérios de dimensionamento para controlo da fadiga em misturas SAPEM (SANRAL, 2014) e comparação com o critério de fadiga da Shell (1978) em camadas de desgaste com granulometria contínua

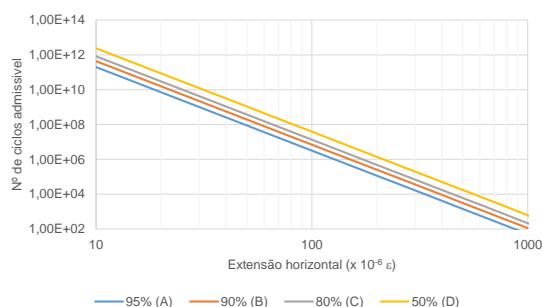
Nas Figuras 3.5 e 3.6 são apresentados graficamente os critérios de dimensionamento relativos ao controlo da fadiga em misturas betuminosas de base, incluindo o critério da Shell usualmente adotado em Portugal para o módulo de deformabilidade correspondente. Adotou-se uma percentagem volumétrica de betume de 10%. Da análise das Figuras 3.5 e 3.6 verifica-se que o critério para a categoria A, em camadas de base, é mais condicionante que o critério Shell para a gama de valores de deformabilidade adotados.



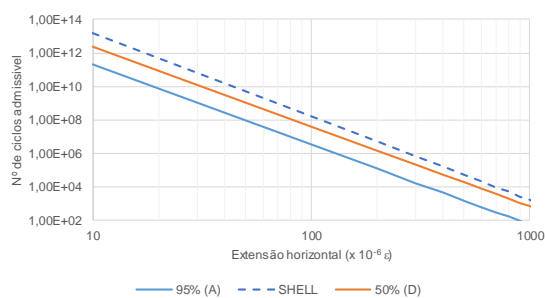
a) E=1000 MPa



b) E=1000 MPa versus Shell

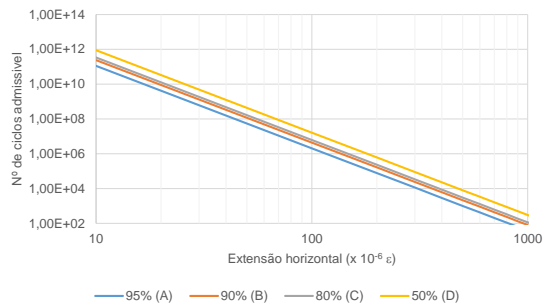


c) E=2000 MPa

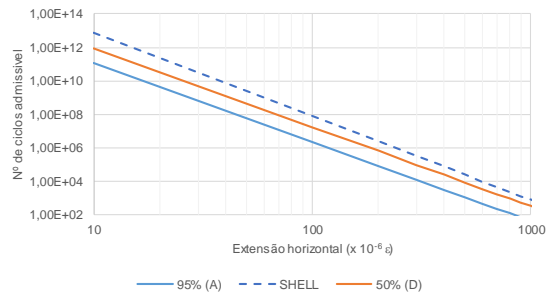


d) E=2000 MPa versus Shell

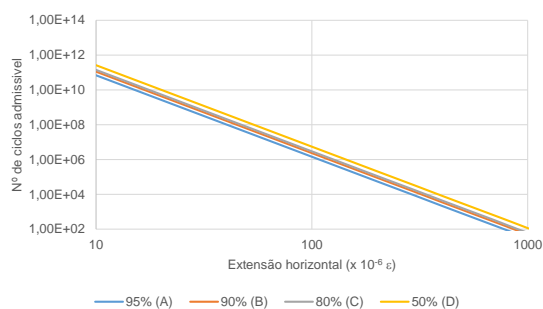
Figura 3.5 – Critérios de dimensionamento para controlo da fadiga em misturas SAPEM (SANRAL, 2014) e comparação com o critério de fadiga da Shell (1978) em camadas de base para módulos de deformabilidade de 1000 MPa e 2000 MPa (SF unitário)



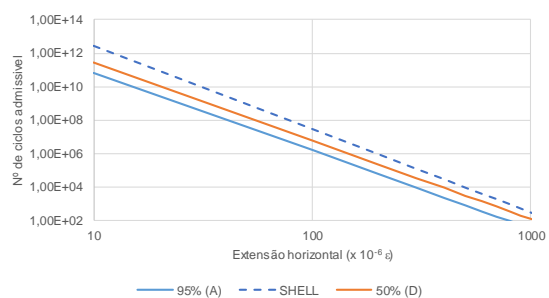
a) E=3000 MPa



b) E=3000 MPa versus Shell



a) c) E=5000 MPa



d) E=5000 MPa versus Shell

Figura 3.6 – Critérios de dimensionamento para controlo da fadiga em misturas SAPEM (SANRAL, 2014) e comparação com o critério de fadiga da Shell (1978) em camadas de base para módulos de deformabilidade de 3000 MPa e 5000 MPa (SF unitário)

Na Figura 3.7 são comparados, para uma estrada da categoria A, os critérios de dimensionamento relativos ao controlo da fadiga em misturas betuminosas de base, comparação com o critério da Shell usualmente adotado em Portugal para o módulo de deformabilidade correspondente, e para valores correntes de espessura de camada de base, tendo em consideração o FS associado à espessura em misturas indicada. Da análise da Figura 3.7 verifica-se que o critério para a categoria A em camadas de base, independentemente da adoção de um fator de amplificação, continua a ser mais condicionante que o critério Shell para a gama de valores de deformabilidade adotados.

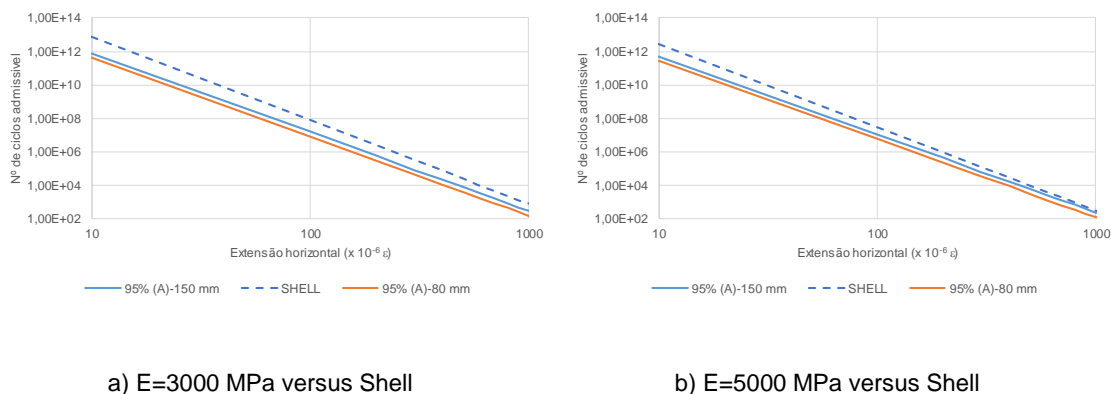


Figura 3.7 – Critérios de dimensionamento para controlo da fadiga em misturas SAPEM (SANRAL, 2014) e comparação com o critério de fadiga da Shell (1978) em camadas de base para módulos de deformabilidade de 3000 MPa e 5000 MPa (SF = 3,69 para 80 mm e SF = 7,11 para 150 mm)

3.7.3 Materiais com ligantes hidráulicos

Os materiais estabilizados com ligantes hidráulicos são avaliados tendo em conta três critérios distintos, o critério de fadiga, o critério de início de esmagamento e o critério de esmagamento avançado.

O critério de dimensionamento de fadiga para materiais estabilizados com ligantes hidráulicos tem por objetivo limitar a ocorrência de fendilhamento por fadiga e o consequente aparecimento de fendas à superfície do pavimento e é definido em função da extensão horizontal na base da camada estabilizada com ligantes hidráulicos ($\varepsilon_{t, lh}$), dendo dado por:

$$N = SF \times 10^c \left(1 - \frac{\varepsilon_{t, lh}}{d \varepsilon_{ultimo}} \right) \quad (3.8)$$

sendo N o número de aplicações de carga do eixo padrão, C e d constantes, dadas em função da categoria da estrada (Tabela 3.18), ε_{ultimo} é a extensão de rotura (Tabela 3.15) e SF um fator de amplificação que tem em conta a espessura da camada estabilizada com ligantes hidráulicos, dado por:

$$SF = \begin{cases} 1 & \text{se } e < 102 \text{ mm} \\ 10^{(0.00285 e - 0.293)} & \text{se } 102 \text{ mm} \leq e \leq 419 \text{ mm} \\ 8 & \text{se } e > 419 \text{ mm} \end{cases} \quad (3.9)$$

Em que e é a espessura da camada em mm. Tal como nas misturas betuminosas de base, quanto mais espessa for a camada maior é a resistência à propagação de fendas para a superfície.

O critério de dimensionamento de início de esmagamento de materiais estabilizados com materiais hidráulicos tem por objetivo indicar o início da ocorrência de fendilhamento por compressão, que tem como consequência o aparecimento de deformações permanentes à superfície do pavimento e é definido em função da tensão vertical na base da camada estabilizada ($\sigma_{v.lh}$), sendo dado por:

$$N = 10^{a \left(1 - \frac{\sigma_{v.lh}}{b \sigma_c} \right)} \quad (3.10)$$

sendo N o número de aplicações de carga do eixo padrão, a e b constantes dadas em função da categoria da estrada (Tabela 3.18) e σ_c a tensão de compressão simples do material (Tabela 3.15).

O critério de esmagamento avançado dos materiais estabilizados com materiais hidráulicos tem por objetivo limitar o aparecimento de deformação permanente à superfície do pavimento por esmagamento generalizado do material e é definido em função da tensão vertical no topo da camada estabilizada com ligantes hidráulicos ($\varepsilon_{t.lh}$), sendo dado por:

$$N = 10^{a \left(1 - \frac{\varepsilon_{t.lh}}{b \sigma_c} \right)} \quad (3.11)$$

sendo N o número de aplicações de carga do eixo padrão, a e b constantes, dadas em função da categoria da estrada (Tabela 3.18) e σ_c a tensão de compressão simples do material (Tabela 3.15).

Tal como indicado em SAPEM (SANRAL, 2014), o único critério associado à ruína estrutural da camada tratada com ligantes hidráulicos é o critério de fadiga; os critérios de esmagamento não indicam a ruína do material, mas sim um possível impacto na deformação permanente à superfície. Devem ser, no entanto, tidos em consideração no dimensionamento de pavimentos rodoviários.

Tabela 3.18 – Constantes para o critério de fadiga, início de esmagamento e esmagamento avançado em materiais estabilizados com ligantes hidráulicos, SAPEM (SANRAL, 2014)

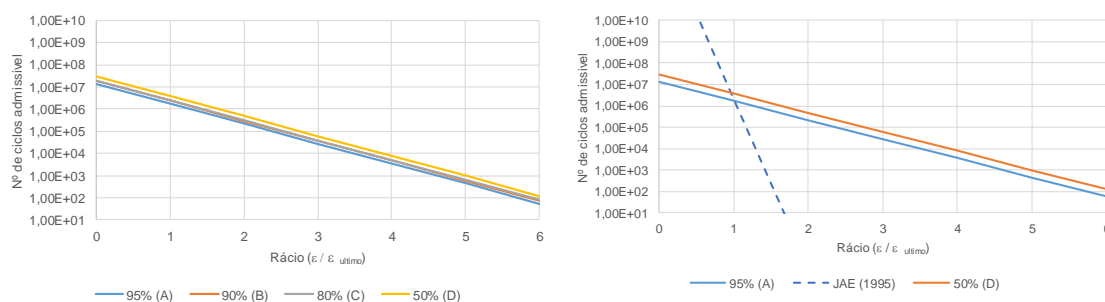
Categoria	Esmagamento (início)		Esmagamento (avançado)		Fadiga	
	a	b	a	b	c	d
95% (A)	7,3860	1,09	8,064	1,190	6,72	7,49
90% (B)	7,5060	1,10	8,184	1,200	6,84	7,63
80% (C)	7,7060	1,13	8,384	1,230	6,87	7,66
50% (D)	8,2160	1,21	8,894	1,310	7,06	7,86

Na Figura 3.8 são apresentados graficamente os critérios de dimensionamento relativos ao controlo da fadiga em materiais estabilizados com ligantes hidráulicos, incluindo o critério de

fadiga proposto pela JAE (1995) de tensões para materiais com ligantes hidráulicos. Adota-se em abcissas o valor do rácio $\frac{\varepsilon_{t.lh}}{\varepsilon_{ultimo}}$.

Da análise da Figura 3.8 verifica-se que o critério mais condicionante é o da JAE (1995) adotado no projeto de pavimentos em Portugal, só para valores de extensão horizontal de cálculo baixos é que os critérios indicados no SAPEM (SANRAL, 2014) são mais exigentes.

Na Figura 3.9 são apresentados graficamente os critérios de dimensionamento relativos ao controlo da deformação permanente em materiais estabilizados com ligantes hidráulicos, início de esmagamento e esmagamento avançado.

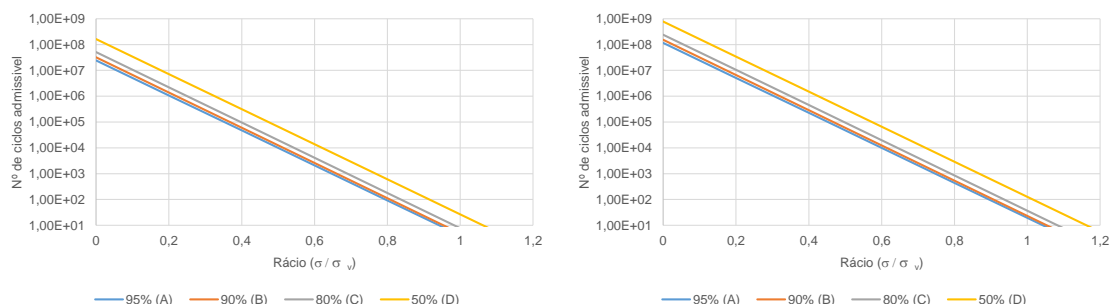


a) SAPEM

b) SAPEM versus JAE-(1995)

$$R_{ft} = 0,45 \text{ MPa}, E_{lh} = 2000 \text{ MPa e } \alpha = 0,07$$

Figura 3.8 – Critérios de dimensionamento para controlo da fadiga em materiais tratados com ligantes hidráulicos SAPEM (SANRAL, 2014) e comparação com o critério de fadiga proposto em JAE (1995) para materiais com ligantes hidráulicos – SF = 2,63 correspondente a uma espessura de 250 mm



a) Início de esmagamento

b) Esmagamento avançado

Figura 3.9 – Critérios de dimensionamento para controlo de esmagamento em materiais tratados com ligantes hidráulicos, SAPEM (SANRAL, 2014)

3.7.4 Materiais granulares

O critério de dimensionamento dos materiais granulares em camada de base e sub-base tem por objetivo limitar a ocorrência de excessivas deformações permanentes nestes materiais e o consequente aparecimento de cavados de rodadeira à superfície do pavimento. O critério de dimensionamento tem por base a comparação entre o estado de tensão de corte atuante e os parâmetros resistentes ao corte, coesão e ângulo de atrito, com base num modelo simples de Mohr-Coulomb. O critério de rotura é então definido com base no fator de segurança ao corte dado por:

$$N = 10^{(\alpha SF + \beta)} \quad (3.12)$$

sendo N o número de aplicações de carga do eixo padrão, α e β constantes, dadas em função da categoria da estrada e do teor de humidade da camada granular (Tabela 3.19) e SF é um fator de segurança dado pelo quociente entre o valor de corte resistente e o valor de corte atuante:

$$SF = \frac{\sigma_{3.cg} \left(K \left(\tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) - 1 \right) + 2 K C \tan \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) \right)}{\sigma_{1.cg} - \sigma_{3.cg}} \quad (3.13)$$

$$= \frac{\sigma_{3.cg} \phi_p + C_p}{\sigma_{1.cg} - \sigma_{3.cg}}$$

em que $\sigma_{1.cg}$ e $\sigma_{3.cg}$ são as tensões principais I e III de cálculo atuantes a meio da camada granular, (adotando-se a convenção de compressão positiva), ϕ_p e C_p são os termos angulares e de coesão (Tabela 3.20) e K é um termo que depende do grau de saturação da camada granular, dado por:

$$K = \begin{cases} 0,65 & \text{se saturado} \\ 0,80 & \text{se moderado} \\ 0,95 & \text{se normal} \end{cases} \quad (3.14)$$

Se a tensão principal III $\sigma_{3.cg}$ for negativa (tensão de tração), o círculo de Mohr para efeitos de cálculo do fator de segurança sofre uma translação, o valor de $\sigma_{3.cg}$ é anulado e o valor da tensão principal I $\sigma_{1.cg}$ corrigida é aumentado do valor absoluto de $\sigma_{3.cg}$, mantendo-se assim o valor da tensão deviatórica ($\sigma_{1.cg} - \sigma_{3.cg}$), ver Figura 3.11.

Tabela 3.19 – Constantes para o critério de deformações permanentes por corte em materiais granulares, SAPEM (SANRAL, 2014)

Categoria	α	β
95% (A)	2,605122	3,480098
90% (B)	2,605122	3,707667
80% (C)	2,605122	3,983324
50% (D)	2,605122	4,510819

Tabela 3.20 – Valores de ângulo de atrito e coesão a adotar no critério de deformações permanentes por corte em materiais granulares, SAPEM (SANRAL, 2014)

Valores dos termos de atrito e coesão							
Material	Seco		Moderado		Húmido		
	ϕ_p	C_p (MPa)	ϕ_p	C_p (MPa)	ϕ_p	C_p (MPa)	
G1	8,61	0,392	7,03	0,282	5,44	0,171	
G2	7,06	0,303	5,76	0,221	4,46	0,139	
G3	6,22	0,261	5,08	0,188	3,93	0,115	
G4	5,50	0,223	4,40	0,160	3,47	0,109	
G5	3,60	0,143	3,30	0,115	3,17	0,083	
G6	2,88	0,103	2,32	0,084	1,76	0,064	
EG4	4,02	0,140	3,50	0,120	3,12	0,100	
EG5	3,37	0,120	2,80	0,100	2,06	0,080	
EG6	1,63	0,100	1,50	0,080	1,40	0,060	

Na Figura 3.10 são apresentados graficamente os critérios de dimensionamento relativos ao controlo de deformação permanente em materiais granulares em função do fator de segurança respectivo.

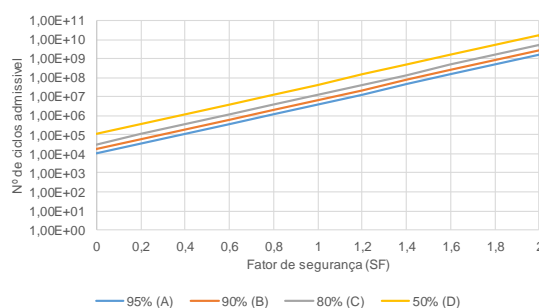
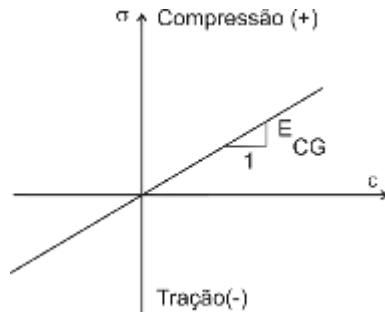
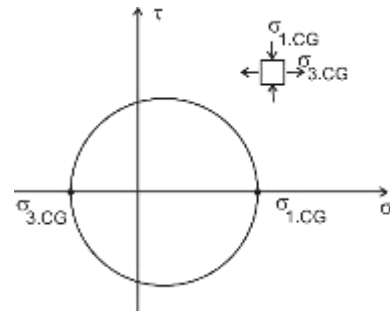


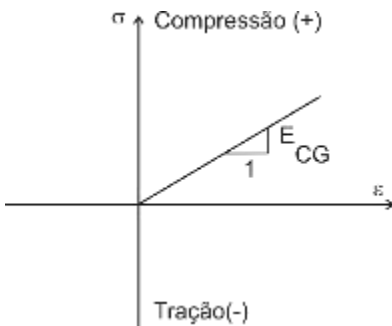
Figura 3.10 – Critérios de dimensionamento relativos ao controlo de deformação permanente em camadas com materiais granulares, SAPEM (SANRAL, 2014)



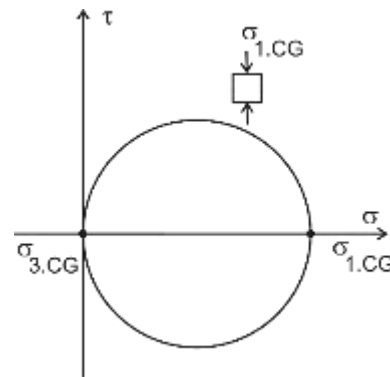
a) Modelo elástico linear



b) Círculo de Mohr (modelo multicamada)



c) Modelo elástico linear à compressão



d) Círculo de Mohr ajustado

Figura 3.11 – Ajustamento dos valores de tensão principal a considerar no critério de dimensionamento à deformação permanente, SAPEM (SANRAL, 2014)

3.8 Aplicações

3.8.1 Pavimento flexível: camada de base e sub-base granular

Em seguida para uma estrutura de pavimento tipo flexível, realiza-se uma análise comparativa entre a metodologia de dimensionamento indicada no SAPEM (SANRAL, 2014), que tem por base o modelo mecanicista Sul-africano, e a metodologia de dimensionamento geralmente adotada em Portugal.

No dimensionamento com base na metodologia proposta no SAPEM adotou-se um número de passagens de eixos equivalentes de 80 kN de, $3,0 \times 10^6$, que corresponde ao valor máximo de passagens de uma classe de tráfego ES3 (TRH4, 1996). No dimensionamento com base na

metodologia adotada em Portugal adotou-se um número de passagens de eixos equivalentes de 130 kN, de $4,302 \times 10^5$ o que corresponde à adoção de um expoente de 4 na conversão de eixos padrão de 80 kN para eixos padrão de 130 kN.

Por simplificação, assume-se que a estrada estava localizada na região de Faro com uma temperatura de projeto equivalente anual do ar de 19,1°C. A estrutura de pavimento flexível a verificar de acordo com o SAPEM (SANRAL, 2014) é a apresentada na Figura 3.12a). As propriedades dos materiais adotadas são as adequadas aos materiais indicados para estradas de categoria A. Adotou-se um período de dimensionamento de 20 anos.

Com base na metodologia de dimensionamento adotada em Portugal, realizou-se a verificação da estrutura de pavimento indicada na Figura 3.12a). Realizou-se ainda uma verificação estrutural em que se adotou a metodologia Portuguesa na definição dos módulos de deformabilidade das misturas (em função da temperatura equivalente anual), das camadas granulares (função da aplicação da fórmula Shell) e da análise das condições de fundação com base no indicado em JAE (1995), a partir dos valores de referência de CBR dos solos adotados. A estrutura retificada com base na metodologia Portuguesa está indicada na Figura 3.12b). No cálculo do módulo de deformabilidade das misturas betuminosas adotou-se uma classe de betume 35/50.

Camada	Designação	e (cm)	E (MPa)	v	Camada	Designação	e (cm)	E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	5	3000	0,4	1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	5	3900	0,4
2	Mistura betuminosa contínua em camada de base	12	4000	0,4	2	Mistura betuminosa contínua em camada de base	12	4300	0,4
3	Camada granular em material britado (G2)	15	250	0,3	3	Camada granular em material britado (G2)	15	160	0,3
4	Camada granular em material natural (G5)	20	200	0,3	4	Camada granular em material natural (G5)	20	90	0,3
5	Solo de fundação com índice CBR superior a 15 (G7)	15	120	0,3	5	Solo de fundação da classe F2	∞	60	0,3
6	Solo de fundação com índice CBR superior a 7 (G9)	∞	70	0,3					

a) Metodologia SAPEM

b) Metodologia corrente em Portugal (estrutura retificada)

Figura 3.12 – Modelo de análise para verificação estrutural (camada de base e sub-base granular) – Metodologia SAPEM (SANRAL, 2014)

Da análise das Tabelas 3.21 e 3.22 verifica-se que, para um pavimento flexível de base e sub-base granular, a metodologia Sul-africana é muito mais condicionante, conduzindo a valores de dano estrutural mais elevados. Mesmo numa análise em que se adota de forma mais conservativa a metodologia de projeto usual em Portugal, a todas as camadas estruturais, verifica-se que o dano estrutural obtido continua a ser inferior ao valor de dano previsto com a metodologia Sul-africana.

Tabela 3.21 – Verificação estrutural para o pavimento com camada granular em base e sub-base – Metodologia SAPEM (SANRAL, 2014) - Dano de 0,750

a) Fadiga em misturas betuminosas

Material	Nº de passagens no horizonte de projeto (Eixo padrão de 80 kN)	Misturas betuminosas (MB)			
		Extensão horizontal ($\times 10^{-6}$) (cálculo)	Extensão horizontal ($\times 10^{-6}$) (admissível)	Nº de passagens (admissível)	Dano MB
Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste - MB1	3,000E+06	-10,680	159,268	-----	0,000
Mistura betuminosa contínua em camada de base - MB2		120,889	128,497	4,000E+06	0,750

b) Deformação permanente em camadas granulares

Material	Nº de passagens no horizonte de projeto (Eixo padrão de 80 kN)	Camada Granular (CG)				
		Tensão principal 1 (MPa) (cálculo)	Tensão principal 3 (MPa) (cálculo)	Fator de segurança (cálculo)	Fator de segurança (admissível)	Nº de passagens (admissível)
Camada granular em material britado (G2) - CG1	3,000E+06	0,054	-0,008	4,928	1,150	2,080E+16
Camada granular em material natural (G5) - CG2		0,029	-0,011	3,548	1,150	5,270E+12

c) Deformação permanente em solos de fundação

Material	Nº de passagens no horizonte de projeto (Eixo padrão de 80 kN)	Solo de fundação (SF)			
		Extensão vertical ($\times 10^{-6}$) (cálculo)	Extensão vertical ($\times 10^{-6}$) (admissível)	Nº de passagens (admissível)	Dano SF
Solo de fundação com índice CBR superior a 15 (G7) - SF1	3,000E+06	207,734	481,158	1,330E+10	0,000
Solo de fundação com índice CBR superior a 7 (G9) - SF2		225,690	481,158	5,820E+09	0,001

Tabela 3.22 – Verificação estrutural para o pavimento com camada granular em base e sub-base – Metodologia Portuguesa – Estrutura SAPEM (SANRAL, 2014) - Dano de 0,251

a) Fadiga em misturas betuminosas

Material	Nº de passagens no horizonte de projeto (Eixo padrão de 130 kN)	Misturas betuminosas (MB)			
		Extensão horizontal ($\times 10^{-6}$) (cálculo)	Extensão horizontal ($\times 10^{-6}$) (admissível)	Nº de passagens (admissível)	Dano MB
Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste - MB1	4,302E+05	-26,380	328,530	-----	0,000
Mistura betuminosa contínua em camada de base - MB2		190,845	251,537	1,711E+06	0,251

b) Deformação permanente em solos de fundação

Material	Nº de passagens no horizonte de projeto (Eixo padrão de 130 kN)	Solo de fundação (SF)		Nº de passagens (admissível)	Dano SF
		Extensão vertical (x10 ⁻⁶) (cálculo)	Extensão vertical (x10 ⁻⁶) (admissível)		
Solo de fundação com índice CBR superior a 15 (G7) - SF1	4,302E+05	336,005	702,837	8,236E+06	0,052
Solo de fundação com índice CBR superior a 7 (G9) - SF2		365,516	702,837	5,881E+06	0,073

Tabela 3.23 – Verificação estrutural para o pavimento com camada granular em base e sub-base – Metodologia Portuguesa – Estrutura retificada - Dano de 0,611

a) Fadiga em misturas betuminosas

Material	Nº de passagens no horizonte de projeto (Eixo padrão de 130 kN)	Misturas betuminosas (MB)		Nº de passagens (admissível)	Dano MB
		Extensão horizontal (x10 ⁻⁶) (cálculo)	Extensão horizontal (x10 ⁻⁶) (admissível)		
Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste - MB1	4,302E+05	-29,581	298,920	-----	0,000
Mistura betuminosa contínua em camada de base - MB2		222,097	245,072	7,038E+05	0,611

b) Deformação permanente em solos de fundação

Material	Nº de passagens no horizonte de projeto (Eixo padrão de 130 kN)	Solo de fundação (SF)		Nº de passagens (admissível)	Dano SF
		Extensão vertical (x10 ⁻⁶) (cálculo)	Extensão vertical (x10 ⁻⁶) (admissível)		
Solo de fundação da classe F2	4,302E+05	520,872	702,837	1,426E+06	0,302

3.8.2 Pavimento flexível: camada de base granular e sub-base estabilizada com cimento

Em seguida, considera-se uma estrutura de pavimento do tipo flexível com camada de base granular e camada de sub-base estabilizada com cimento. Admite-se que a camada estabilizada com cimento adotada (C3) se pode enquadrar num solo-cimento de acordo com as propriedades indicadas em JAE (1995), considerando-se que é uma estrutura de pavimento com comportamento similar à de uma estrutura inversa. Admitiu-se, aquando da aplicação da metodologia Portuguesa que a camada estabilizada com cimento apresenta uma resistência à tração em flexão de 0,45 MPa e adotou-se um expoente α de 0,08 na aplicação do critério de fadiga.

A interposição da camada granular evita a propagação de fendas da camada estabilizada com cimento para as camadas superiores em misturas betuminosas. Em SAPEM (SANRAL, 2014), admite-se que o período de vida útil da estrutura é dado pela soma do período de vida útil em fase não fendilhada e em fase fendilhada, admitindo-se para a camada granular tratada com

cimento um módulo de deformabilidade equivalente a um granular. Na análise realizada só se analisou a estrutura em fase não fendilhada.

Admitiram-se os mesmos pressupostos de análise que no ponto anterior (3.8.1). A estrutura de pavimento flexível (SAPEM, 2014) é a apresentada na Figura 3.13 a). A estrutura retificada com base na metodologia Portuguesa está indicada na Figura 3.13 b).

Camada	Designação	e (cm)	E (MPa)	v	Camada	Designação	e (cm)	E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	5	3000	0,4	1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	5	3900	0,4
2	Mistura betuminosa contínua em camada de base	12	4000	0,4	2	Mistura betuminosa contínua em camada de base	12	4300	0,4
3	Camada granular em material britado (G2)	15	400	0,3	3	Camada granular em material britado (G2)	15	400	0,3
4	Camada granular (G5/G6) estabilizada com cimento (C3)	20	2000	0,3	4	Camada granular (G5/G6) estabilizada com cimento (C3)	20	2000	0,3
5	Solo de fundação com índice CBR superior a 15 (G7)	15	120	0,3	5	Solo de fundação da classe F2	∞	60	0,3
6	Solo de fundação com índice CBR superior a 7 (G9)	∞	70	0,3					

a) Metodologia SAPEM (SANRAL, 2014)

b) Metodologia corrente em Portugal (estrutura retificada)

Figura 3.13 – Modelo de análise para verificação estrutural (camada de base granular e sub-base estabilizada com cimento) – Metodologia SAPEM (SANRAL, 2014)

Tabela 3.24 – Verificação estrutural para o pavimento com camada granular em base e sub-base estabilizada com cimento – Metodologia SAPEM (SANRAL, 2014) – Dano de 0,741

a) Fadiga em misturas betuminosas

Material	Nº de passagens no horizonte de projeto (Eixo padrão de 80 kN)	Misturas betuminosas (MB)			
		Extensão horizontal (x10 ⁻⁶) (cálculo)	Extensão horizontal (x10 ⁻⁶) (admissível)	Nº de passagens (admissível)	Dano MB
Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste - MB1	3,000E+06	-2,115	159,268	-----	0,000
Mistura betuminosa contínua em camada de base - MB2		82,896	128,497	2,360E+07	0,127

b) Deformação permanente em camadas granulares

Material	Nº de passagens no horizonte de projeto (Eixo padrão de 80 kN)	Camada Granular (CG)				
		Tensão principal 1 (MPa) (cálculo)	Tensão principal 3 (MPa) (cálculo)	Fator de segurança (cálculo)	Nº de passagens (admissível)	Dano CG
Camada granular em material britado (G2) - CG1	3,000E+06	0,082	0,015	6,088	1,150	2,184E+19

c) Fadiga em camadas estabilizadas com cimento

Material	Nº de passagens no horizonte de projeto (Eixo padrão de 80 kN)	Camada Estabilizada com Cimento (SC)			
		Extensão horizontal (x10 ⁻⁶) (cálculo)	Extensão horizontal (x10 ⁻⁶)(admissível)	Nº de passagens (admissível)	Dano SC
Camada granular (G5/G6) estabilizada com cimento (C3) - CG1	3,000E+06	54,316	72,431	4,047E+06	0,741

d) Início e esmagamento avançado em camadas estabilizadas com cimento

Material	Critério	Nº de passagens no horizonte de projeto (Eixo padrão de 80 kN)	Camada Estabilizada com Cimento (SC)			
			Tensão vertical (MPa) (cálculo)	Tensão vertical (MPa) (admissível)	Nº de passagens (admissível)	Dano SC
Camada granular (G5/G6) estabilizada com cimento (C3) - CG1	Início	3,000E+06	0,059	0,302	1,613E+07	0,186
	Avançado				7,685E+07	0,039

e) Deformação permanente em solos de fundação

Material	Nº de passagens no horizonte de projeto (Eixo padrão de 80 kN)	Solo de fundação (SF)			
		Extensão vertical (x10 ⁻⁶) (cálculo)	Extensão vertical (x10 ⁻⁶)(admissível)	Nº de passagens (admissível)	Dano SF
Solo de fundação com índice CBR superior a 15 (G7) - SF1	3,000E+06	127,535	481,158	1,753E+12	0,000
Solo de fundação com Índice CBR superior a 7 (G9) - SF2		146,498	481,158	4,382E+11	0,000

Tabela 3.25 – Verificação estrutural para o pavimento com camada granular em base e sub-base estabilizada com cimento – Metodologia Portuguesa – Estrutura SAPEM (SANRAL, 2014) – Dano de 0,972

a) Fadiga em misturas betuminosas

Material	Nº de passagens no horizonte de projeto (Eixo padrão de 130 kN)	Misturas betuminosas (MB)			
		Extensão horizontal (x10 ⁻⁶) (cálculo)	Extensão horizontal (x10 ⁻⁶)(admissível)	Nº de passagens (admissível)	Dano MB
Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste - MB1	4,302E+05	-12,690	328,530	-----	0,000
Mistura betuminosa contínua em camada de base - MB2		126,387	251,537	1,343E+07	0,032

b) Fadiga em camadas estabilizadas com cimento

Material	Nº de passagens no horizonte de projeto (Eixo padrão de 130 kN)	Camada Estabilizada com Cimento (SC)			
		Tensão horizontal (MPa) (cálculo)	Tensão horizontal (MPa)(admissível)	Nº de passagens (admissível)	Dano SC
Camada granular (G5/G6) estabilizada com cimento (C3) - CG1	4,302E+05	0,247	0,247	4,427E+05	0,972

c) Deformação permanente em solos de fundação

Material	Nº de passagens no horizonte de projeto (Eixo padrão de 130 kN)	Solo de fundação (SF)		Nº de passagens (admissível)	Dano SF
		Extensão vertical ($\times 10^{-6}$) (cálculo)	Extensão vertical ($\times 10^{-6}$) (admissível)		
Solo de fundação com índice CBR superior a 15 (G7) - SF1	4,302E+05	206,229	702,837	5,803E+07	0,007
Solo de fundação com índice CBR superior a 7 (G9) - SF2		237,242	702,837	3,314E+07	0,013

Tabela 3.26 – Verificação estrutural para o pavimento com camada granular em base e sub-base estabilizada com cimento – Estrutura retificada - Dano de 3,477

a) Fadiga em misturas betuminosas

Material	Nº de passagens no horizonte de projeto (Eixo padrão de 130 kN)	Misturas betuminosas (MB)		Nº de passagens (admissível)	Dano MB
		Extensão horizontal ($\times 10^{-6}$) (cálculo)	Extensão horizontal ($\times 10^{-6}$) (admissível)		
Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste - MB1	4,302E+05	-11,085	298,920	-----	0,000
Mistura betuminosa contínua em camada de base - MB2		122,269	245,072	1,392E+07	0,031

b) Fadiga em camadas estabilizadas com cimento

Material	Nº de passagens no horizonte de projeto (Eixo padrão de 130 kN)	Camada Estabilizada com Cimento (SC)		Nº de passagens (admissível)	Dano SC
		Tensão horizontal (MPa) (cálculo)	Tensão horizontal (MPa) (admissível)		
Camada granular (G5/G6) estabilizada com cimento (C3) - CG1	4,302E+05	0,267	0,247	1,237E+05	3,477

c) Deformação permanente em solos de fundação

Material	Nº de passagens no horizonte de projeto (Eixo padrão de 130 kN)	Solo de fundação (SF)		Nº de passagens (admissível)	Dano SF
		Extensão vertical ($\times 10^{-6}$) (cálculo)	Extensão vertical ($\times 10^{-6}$) (admissível)		
Solo de fundação da classe F2	4,302E+05	281,114	702,837	1,681E+07	0,026

Da análise das Tabelas 3.24 e 3.25 verifica-se que, para um pavimento flexível com uma camada estabilizada com cimento, a metodologia Sul-africana é menos condicionante, conduzindo a valores de dano estrutural mais baixos. Tal como indicado na Figura 3.8 a), a partir de um certo valor de extensão horizontal de cálculo, o critério de dimensionamento à fadiga, adotado em SAPEM (SANRAL, 2014), é menos condicionante que o critério usualmente adotado em Portugal (valores de rácio superiores a aproximadamente 1,0).

Caso se adote de forma mais conservativa a metodologia de projeto usual em Portugal (Tabela 3.26) a todas as camadas estruturais, verifica-se que o valor de dano estrutural é muito mais elevado que o valor previsto com a metodologia Sul-africana.

3.9 Conclusões

O manual de dimensionamento de pavimentos rodoviários da África do Sul é apresentado, dando-se especial referência aos modelos empírico-mecanicistas adotados (SAMDM). Das análises realizadas verifica-se que:

- O dimensionamento de pavimentos rodoviários é realizado em função de níveis distintos de serviço, que são definidos em função da importância da estrada (A a D). Em Portugal, para estradas do tipo A, B e C, os princípios e os critérios são iguais;
- A caracterização do tráfego e do período de dimensionamento seguem princípios próximos do modelo usualmente adotado em Portugal. A geometria do eixo padrão equivalente é ligeiramente diferente da Portuguesa, sendo que ao invés das normas Sul-africanas que ainda adotam o eixo padrão de 80 kN, em Portugal atualmente adota-se o eixo padrão de 130 kN;
- Os materiais a adotar em camada de base e sub-base granular são mais diversificados, admitindo-se materiais com origem natural. Em Portugal em geral adota-se material do tipo ABGE nestas camadas, que corresponde ao material do tipo G1;
- Os critérios de dimensionamento são mais alargados incluindo o controlo da deformação permanente em camadas granulares e o controlo do início de esmagamento e esmagamento avançado em camadas estabilizadas com cimento;
- Os critérios de dimensionamento relativos à fadiga em misturas betuminosas são menos conservativos para a metodologia adotada em Portugal (menores valores de dano). Não são apontadas expressões para a previsão dos valores de deformabilidade em misturas, mas apenas uma gama de valores de referência em função da temperatura de serviço nas misturas betuminosas;
- Os critérios de dimensionamento relativos à deformação permanente em solos de fundação são menos conservativos para a metodologia Sul-africana, para valores de extensão vertical no topo da camada inferiores a $\approx 600 \times 10^{-6}$ para um valor de deformação permanente limite de 10 mm e inferiores a $\approx 1600 \times 10^{-6}$ para um valor de deformação permanente limite de 20 mm;
- O critério de dimensionamento relativo à fadiga em camadas estabilizadas com cimento é definido em termos de valores de extensão horizontal na base da camada, ao contrário da metodologia adotada em Portugal que considera um critério em função do nível de tensão horizontal na base da camada. Só para valores de rácio de extensão de cálculo sobre extensão última inferiores a $\approx 1,0$ é que o critério de fadiga Sul-africano é mais conservativo que a metodologia adotada em Portugal (maiores valores de dano).

Do exposto anteriormente verifica-se que, em especial para a categoria A, a aplicação da metodologia empírico-mecanicista Sul-africana conduz, relativamente à metodologia usualmente adotada em Portugal, a estruturas de pavimento com camada de base e sub-base granular, com maiores espessuras. Caso se adotem as condições de fundação mais conservativas previstas em JAE (1995) as diferenças das espessuras obtidas em cada metodologia esbatem-se.

4 Manual de dimensionamento de pavimentos rodoviários da SATCC

4.1 Considerações gerais

O manual de dimensionamento de pavimentos rodoviários da *Southern Africa Transport and Communications Commission* (SATCC) foi desenvolvido pela *Division of Roads and Transport Technology* do *Council for Scientific and Industrial Research* (CSIR) da África do Sul, tendo como objetivo criar um manual simples que permita de uma forma expedita o dimensionamento de pavimentos rodoviários do tipo flexível e que cumpra os critérios de projeto, SATCC (CSIR, 1998). O manual SATCC é aplicado nos países da África Austral que pertencem à Southern Africa Development Community (SADC), ver Figura 4.1.

O manual SATCC só considera pavimentos do tipo flexível, podendo ter camadas granulares de base e sub-base estabilizadas com ligantes hidráulicos. O manual SATCC (CSIR, 1998) está limitado ao valor máximo de passagens de eixo padrão equivalente de 80 kN de 30×10^6 e requer como condições mínimas que o solo de fundação apresente um valor de CBR superior a 2%.

Para valores de tráfego superiores a 30×10^6 , o manual SATCC sugere a adoção de métodos adotados em outros Países como por exemplo o Reino Unido, os Estados Unidos da América ou Austrália. Indica ainda que para solos com um valor de CBR inferior a 2%, devem ser estabelecidas medidas curativas (estabilização com cal, remoção do material numa dada profundidade ou introdução de geo-materiais).

As estruturas de pavimento rodoviário indicadas no catálogo de pavimentos do manual SATCC apresentam as seguintes desvantagens associadas a um dimensionamento por catálogo:

- Não têm em consideração a grande variabilidade climática que existe ao longo da região correspondente à SADC, em especial no que se refere às condições de temperatura;
- As estruturas do catálogo estão dimensionadas para o valor máximo de tráfego da classe a que correspondem e não para o valor desejado;
- Os materiais a adotar, bem como as respetivas espessuras, estão condicionados pelo indicado no catálogo.

Tal como indicado em SATCC (CSIR, 1998), as estruturas de catálogo adotadas tiveram por base outros catálogos de estruturas, como por exemplo o TRH4 (1996), definido com base no critério empírico-mecanicista Sul-africano, e o catálogo de estruturas RN31 (1983), que tem por base a experiência adquirida na construção de estradas em zonas similares e em ensaios em pavimentos reais.



Figura 4.1 – Países onde o manual SATCC pode ser adotado, retirado de <http://www.sadc.int/member-states/>

4.2 Período de dimensionamento

De acordo com o SATCC (CSIR, 1998), o período de dimensionamento é o período durante o qual a estrada apresenta um nível de serviço satisfatório sem necessitar de ser intervencionada. A estrada poderá, no entanto, sofrer pequenas intervenções de manutenção de modo a garantir que o período de dimensionamento seja atingido. Em SATCC (CSIR, 1998) é indicado que o período de dimensionamento deve estar compreendido entre 10 a 20 anos, ver Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Guia para seleção do período de dimensionamento, SATCC (CSIR, 1998)

Nível de confiança	Nível de serviço/Importância	
	Baixo	Alto
Baixo	10 a 15 anos	15 anos
Alto	10 a 20 anos	15 a 20 anos

4.3 Tráfego

4.3.1 Caracterização do tráfego

O catálogo de dimensionamento da SATCC (CSIR, 1998) tem por base a definição do número de passagens de eixos padrão equivalentes de 80 kN e segue praticamente o definido em 3.4.2 relativamente ao manual SAPEM (SANRAL, 2014) em termos da conversão do espectro de veículos pesados em número de passagens de eixo padrão equivalente e em termos do cálculo do número de eixos padrão acumulado no período de dimensionamento, tendo em conta uma dada taxa de crescimento.

4.3.2 Classe de tráfego

As estruturas de pavimento do catálogo SATCC (CSIR, 1998) são definidas em função da classe de tráfego, que por sua vez é definida com base no número de passagens de eixo padrão equivalente de 80 kN durante o período de dimensionamento, ver Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Classes de tráfego, SATCC (CSIR, 1998)

Nº de eixos padrão equivalentes de 80 kN ($\times 10^6$)	Classes de tráfego							
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
	< 0,3	0,3 a 0,7	0,7 a 1,5	1,5 a 3	3 a 6	6 a 10	10 a 17	17 a 30

4.4 Condições de fundação

As estruturas de pavimento do catálogo SATCC (CSIR, 1998) dependem igualmente do tipo de solo de fundação. Os solos de fundação são classificados em função do índice CBR do material que assim representa as condições a que o solo de fundação irá estar sujeito. Na prática, o índice CBR deve ser calculado para as condições de teor de humidade e compactação mais condicionantes.

Na Tabela 4.3 apresentam-se as classes de fundação adotadas no manual da SATCC (CSIR, 1998). Estas devem ser classificadas de acordo com a metodologia indicada na Tabela 4.4. De acordo com o manual da SATCC (CSIR, 1998), o teor de água de projeto (DM) é dado por:

$$DM = 0,67 OMC(\%) + 0,8 \quad (4.1)$$

Em que OMC é o teor de ótimo de água obtido no ensaio AASHTO T-99.

Tabela 4.3 – Classes de fundação, SATCC (CSIR, 1998)

índice CBR (%)	Classes de solo de fundação					
	S1	S2	S3	S4	S5	S6
	2	3 a 4	5 a 7	8 a 14	15 a 29	> 30

Tabela 4.4 – Método de escolha do valor de CBR de solos de fundação, SATCC (CSIR, 1998)

Condições do solo de fundação	Condições das amostras nos ensaios de CBR laboratoriais
Em alguns períodos ocorrem situações de saturação (época de chuvas, zonas com nível freático alto e potenciais zonas de inundação)	CBR a 100% de compactação para as condições ótimas (AASHTO T-99). Valores de CBR obtidos após 4 dias embebido em água
Ocorrência de situações de saturação pouco provável, mas épocas com maior humidade podem ocorrer	CBR a 100% de compactação para as condições ótimas (AASHTO T-99). Valores de CBR obtidos sem embebição em água
Condições secas (nível freático baixo)	CBR a 100% de compactação para as condições ótimas (AASHTO T-99). Amostras são posteriormente secas até se obter o teor de água de projeto. Valores de CBR obtidos sem embebição em água

O método de escolha de CBR (

Tabela 4.4) assume que o solo de fundação *insitu* apresenta um grau de compactação correspondente a 100% para o teor de humidade ótimo do ensaio Proctor (ou 95% de compactação do ensaio AASHTO modificado). Em SATCC (CSIR, 1998) é ainda indicado que se deve adotar como valor de CBR de projeto o percentil 10 dos valores de CBR obtidos na campanha de prospeção.

No manual SATCC (CSIR, 1998) é igualmente introduzido o conceito de profundidade de prospeção do solo de fundação, que não é mais do que a profundidade à qual a futura estrutura do pavimento vai assentar e onde se intersejam os materiais que irão influenciar o comportamento dessa, sendo este valor definido em função da classe de fundação, ver Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Profundidade de prospeção em função da classe de fundação, SATCC (CSIR, 1998)

d_{min} (m)	S1	S2	S3	S4	S5	S6
	0,25	0,25	0,35	0,45	0,55	0,65

4.5 Condições climáticas

O catálogo de estruturas de pavimento do SATCC (CSIR, 1998) é definido em função da região em que se inserem: região húmida (W) e região seca (D). Na Tabela 4.6 é indicado o critério de

seleção da escolha da região climática de dimensionamento de acordo com o nível de humidade da região.

Em zonas secas, o catálogo de estruturas a seguir é o da zona *D*. Em zonas húmidas é necessário analisar as condições de drenagem, manutenção e tráfego por forma a decidir se o catálogo de estruturas deve corresponder à letra *W* ou se as condições existentes permitem que se adote o catálogo *D* que é menos condicionante, ver Tabela 4.7.

Tabela 4.6 – Critério de seleção da região climática de dimensionamento de acordo com o nível de humidade, SATCC (2014)

Região climática	Precipitação média Precipitação média anual (mm)	Observações
Seca	< 250	Não se preve a ocorrência de situações que levem a um aumento do teor de humidade dos solos (ex. inundações, proximidade de linhas de água)
Húmida	> 500	Preve-se a ocorrência de situações que levem a um aumento significativo do teor de humidade dos solos

Região seca: Catálogo de estruturas para zona seca (*D*); Região húmida: é necessário definir as condições de drenagem e manutenção antes da escolha do tipo de solução estrutural

Tabela 4.7 – Critério de seleção da região de dimensionamento em zonas húmidas, SATCC (2014)

Condições de manutenção			
Condições de drenagem	Boa, bem programada e reparações contínuas		Deficiente
	D		
Boa, bem planeada e executada	D		
	Nível de tráfego		Nível de tráfego
	Baixo (Classes T1 e T2)		Alto (Classes T3 e acima)
	D		W
Deficiente	Nível de tráfego		
	Baixo (Classes T1 e T2)		Alto (Classes T3 e acima)
	D		W

W - Catálogo de estruturas para zona húmida e D - Catálogo de estruturas para zona seca

4.6 Materiais de pavimentação

O catálogo de estruturas da SATCC (CSIR, 1998) está pré-definido para um conjunto de materiais. De uma forma sucinta descrevem-se na Tabela 4.8 os materiais adotados em camada de sub-base, base e no melhoramento de solos de fundação. Para camada de desgaste o manual preconiza revestimentos superficiais ou misturas betuminosas a quente.

Tabela 4.8 – Materiais de pavimentação adotados no catálogo SATCC (CSIR, 1998)

Camada	Material	Exigências
Base	Granular	CBR embebido a 98% de compactação do ensaio AASHTO modificado > a 80%
	Estabilizada	Compressão uniaxial simples aos 7 dias entre 1.5 a 3.0 MPa e o material compactado a 100% de compactação do ensaio AASHTO modificado
	Betuminosa	ver especificações TRH3
Sub-base	Granular	CBR embebido a 95% de compactação do ensaio AASHTO modificado > a 30%
	Estabilizada	Compressão uniaxial simples aos 7 dias entre 0.75 a 1.5 Mpa e material compactado a 100% de compactação do ensaio AASHTO modificado
Reposição de solos		CBR embebido a 93% de compactação do ensaio AASHTO modificado > a 15%

4.7 Solução estrutural






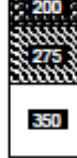










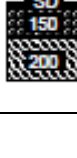
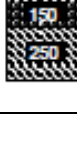
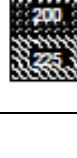
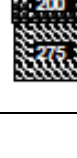

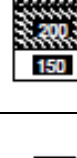
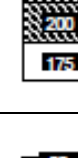
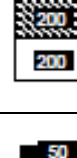









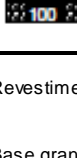
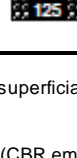
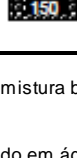
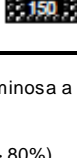
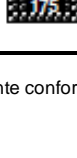
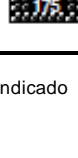
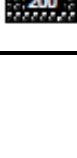
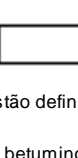
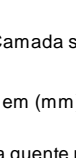
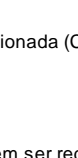
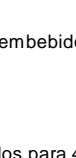
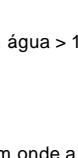



O catálogo de estruturas da SATCC (CSIR, 1998) está pré-definido com base em várias tipologias de estruturas, definidas em função dos materiais adotados para camada de base e sub-base. Existem assim cinco tipologias de estrutura (ver Tabela 4.9). Dado existirem duas possibilidades de região (seca e húmida), o SATCC apresenta dez catálogos diferentes.





Tabela 4.9 – Tipologia de estruturas disponíveis no catálogo SATCC (CSIR, 1998)

Tipologias de estruturas previstas no catálogo de estruturas		
Designação do catálogo	Solução estrutural	Observações
D1 & W1	Combinação de camada de base granular e camada de sub-base granular	Base e sub-base em material natural ou britado. Pode-se adotar material granular do tipo drenante (pedrapleno) se apropriado.
D2 & W2	Combinação de camada de base granular e camada de sub-base estabilizada	Base em material natural ou britado. Sub-base estabilizada com cimento, com cal (até classe T2) ou com emulsão betuminosa (até classe T4)
D3 & W3	Combinação de camada de base e sub-base estabilizada com cimento	Base tratada com cimento ou com emulsão betuminosa até classe T3. Sub-base estabilizada com cimento, com cal (até classe T2) ou com emulsão betuminosa (até classe T4)
D4 & W4	Combinação de camada de base em misturas e sub-base granular	Base em misturas betuminosas a quente fabricadas em central.
D5 & W5	Combinação de camada de base em misturas e sub-base estabilizada com cimento	Base em misturas betuminosas a quente fabricadas em central. Sub-base estabilizada com cimento, com cal (até classe T2) ou com emulsão betuminosa (até classe T4)

Atendendo ao catálogo de estruturas (função do tráfego e do tipo de região), a solução estrutural é definida com base no número de passagens de eixo padrão equivalente de 80 kN no período de vida da estrutura e na classe de fundação, ver Tabela 4.10.

Tabela 4.10 – Catálogo de pavimentos para a região D1 (camada de base e sub-base granular e região seca)

Classe de fundação	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
S1 (CBR 2%)								
S2 (CBR 3%-4%)								
S3 (CBR 5%-7%)								
S4 (CBR 8%-14%)								
S5 (CBR 15%-29%)								
S6 (CBR > 30%)								

 Revestimento superficial ou mistura betuminosa a quente conforme indicado
 Base granular (CBR embebido em água > 80%)
 Sub-base granular (CBR embebido em água > 30%)
 Camada selecionada (CBR embebido em água > 15%)

Nota¹: As espessuras estão definidas em (mm)Nota²: 50mm de mistura betuminosa a quente podem ser reduzidos para 40mm onde a experiência local mostre ser adequada.

4.8 Aplicações

4.8.1 Pavimento flexível localizado em Luanda: Base e sub-base granular

De seguida, procede-se ao dimensionamento de um pavimento flexível localizado em Luanda (Angola) para um volume de tráfego correspondente a $9,0 \times 10^6$, a construir sobre um solo de fundação com um valor de CBR de 10%, correspondente ao percentil 10 dos resultados obtidos na prospeção geotécnica. Optou-se em fase de projeto por uma solução estrutural com camadas de base e sub-base em material granular.

Assim, de acordo com o SATCC (CSIR, 1998), a classe de tráfego de projeto enquadra-se na classe T6 (Tabela 4.2). Com base nos resultados da prospeção geotécnica, verifica-se que o solo se enquadra na classe de fundação S4, Tabela 4.3. É de referir que os valores de CBR correspondem a valores embebidos, obtidos para o teor ótimo de água a 100% de compactação relativo do ensaio AASHTO T-99.

A região de Luanda tem uma temperatura média anual do ar de $25,2^\circ\text{C}$ e uma precipitação anual total de 574,4 mm, INAMET (2016), logo está-se perante uma região com humidade significativa, ver, Tabela 4.6. Assumindo que, durante o período de vida útil da obra as condições de drenagem vão ser deficientes, e que a classe de tráfego é a classe T6, conclui-se que o dimensionamento deve ser feito para o catálogo de pavimentos tipo W, Tabela 4.7.

Dado se ter optado por uma tipologia estrutural com camada de base e sub-base granular o catálogo SATCC (CSIR, 1998) a consultar é o catálogo W1 e a solução estrutural é a apresentada na Figura 4.2.


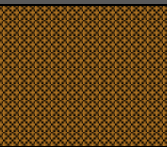
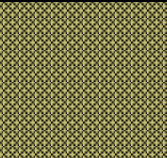
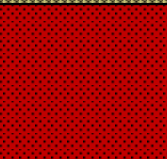
Camada	Designação	e (cm)	
1	Mistura betuminosa continua em camada de desgaste	10,0	
2	Camada granular de base (CBR embebido em água > 80%)	20,0	
3	Camada granular de sub-base (CBR embebido em água > 30%)	17,5	
4	Solo de fundação da classe S4 (CBR 10%)	∞	

Figura 4.2 – Solução estrutural para zona húmida, classe de tráfego T6, classe de fundação S4 e tipologia de material granular em camada de base e sub-base

4.8.2 Pavimento flexível localizado em Namibe: Base granular e sub-base estabilizada com cimento

De seguida, procede-se ao dimensionamento de um pavimento flexível em Namibe (Angola) para um volume de tráfego correspondente a $19,0 \times 10^6$ a construir sobre um solo de fundação com um valor de CBR de 6%, correspondente ao percentil 10 dos resultados obtidos na prospeção geotécnica. Optou-se em fase de projeto por uma solução estrutural em camada de base e sub-base granular estabilizada com cimento.

Assim, de acordo com o SATCC (CSIR, 1998), a classe de tráfego de projeto enquadra-se na classe T8 (ver Tabela 4.2). Com base nos resultados da prospeção geotécnica verifica-se que o solo se enquadra na classe de fundação S3 (ver Tabela 4.3). É de referir que os valores de CBR correspondem a valores obtidos em amostras inicialmente com 100% de compactação relativa do ensaio AASHTO T – 99 e posteriormente secas até se obter o teor de água do projeto.

A região de Namibe tem uma temperatura média anual do ar de $21,1^\circ\text{C}$ e uma precipitação anual total de 166,0 mm, INAMET (2016); logo está-se perante uma região seca, Tabela 4.6. Conclui-se assim que o dimensionamento deve ser feito para o catálogo de pavimentos tipo D.

Dado se ter optado por uma tipologia estrutural com camada de base granular e sub-base granular estabilizada com cimento o catálogo SATCC (CSIR, 1998) a consultar é o catálogo D2 e a solução estrutural é a apresentada na Figura 4.3.


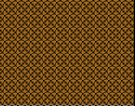
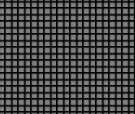
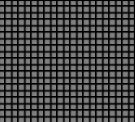
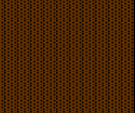
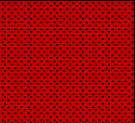
Camada	Designação	e (cm)	
1	Mistura betuminosa continua em camada de desgaste	5,0	
2	Camada granular de base (CBR embebido em água > 80%)	15,0	
3	Camada estabilizada com cimento (σ_c aos 7 dias entre 3 a 5 MPa)	15,0	
4	Camada estabilizada com cimento (σ_c aos 7 dias entre 1,5 a 3 MPa)	15,0	
5	Solos seleccionados (CBR embebido em água > 15%)	15,0	
6	Solo de fundação da classe S3 (CBR 6%)	∞	

Figura 4.3 – Solução estrutural para zona seca, classe de tráfego T8, classe de fundação S3 e tipologia de material granular em camada de base e sub-base granular estabilizada com cimento

4.9 Conclusões

O manual de dimensionamento da SATCC (CSIR, 1998) é apresentado. Verifica-se que a consideração de tráfego e os tipos de materiais adotados nas tipologias de pavimento são próximos das normas Sul-africanas (capítulo 3).

O método indicado é muito expedito, e tem especial importância pois define tipologias que podem ser posteriormente afinadas com base numa metodologia empírico-mecanicista. Tal como referido, um dimensionamento por catálogo não tem em consideração a grande variabilidade climática que existe ao longo da região correspondente à SADC, em especial no que se refere às condições de temperatura. Acresce ainda que as tipologias são definidas para uma gama de valores de deformabilidade do solo de fundação e condições de tráfego muito alargadas.

5 Análise comparativa das diferentes metodologias apresentadas

5.1 Considerações gerais

De modo a avaliar de forma sistemática as abordagens empírico-mecanicistas adotadas em Portugal (capítulo 2) e na África do Sul (capítulo 3), realizou-se a verificação estrutural das secções de pavimentos propostas no catálogo SATCC (CSIR, 1998) (capítulo 4), seguindo os critérios estabelecidos para cada uma destas metodologias.

Em Dos Santos (2015), as estruturas do catálogo D1 e W1 do SATCC (CSIR, 1998) foram avaliadas de acordo com a metodologia adotada em Portugal, para duas velocidades de projeto distintas (20 km/h e 50 km/h) e para três tipos de betume, 40/50, 60/70 e 80/100, sendo assumida uma classe de fundação S4, para várias regiões da SADC (diferentes temperaturas de projeto). Indica-se que a aplicação do manual SATCC (CSIR, 1998) a todas as regiões pode não ser o procedimento mais correto e que as estruturas de catálogo para região húmida (W1) apresentam melhor desempenho que as estruturas de catálogo para região seca (D1).

Afonso e Gomes (2013) realizam uma análise similar em que verificam as secções propostas com base numa metodologia próxima da apresentada no capítulo 2, para algumas regiões da SADC, para três tipos de betume, 40/50, 60/70 e 80/100, para quatro classes de tráfego (T5 a T8) e para as seis classes de fundação. Em Afonso e Gomes (2013). No estudo realizado, concluiu-se que a aplicação do catálogo de estruturas de pavimentos do manual da SATCC (CSIR, 1998) não é o procedimento mais adequado. Não obstante, é indicado que o manual apresenta linhas de orientação técnicas bastante úteis, na definição de tipologias e nos materiais a adotar, devendo, no entanto, a estrutura final ser otimizada com base numa análise empírico-mecanicista, considerando fatores como a temperatura anual ponderada do ar do local e a classe do betume.

Neste estudo, avaliaram-se as estruturas do catálogo, em região seca D1, D4, D5 e em região húmida, W1, W4 e W5, correspondentes às classes de tráfego T6 a T8 e às classes de fundação S2 a S5. Optou-se por não analisar as estruturas de catálogo D2 e W2 (camada de base granular e camada de sub-base estabilizada com cimento) pois estas apresentam, em algumas situações, uma camada de sub-base estabilizada do tipo C2 (compressão uniaxial aos 7 dias entre 3 MPa e 5 MPa), que são indicadas no manual SAPEM (SANRAL, 2014) como sendo uma solução a evitar, dada a sua utilização ter conduzido a situações com elevada fendilhação e consequentemente à reflexão destas fendas às camadas betuminosas superiores.

Optou-se igualmente por não avaliar as estruturas de catálogo D3 e W3 (camada de base e sub-base estabilizada com cimento) pois a verificação da solução de acordo com o SAPEM (SANRAL, 2014) é bastante complexa, dado terem de se estudar três cenários possíveis: sem

fendilhação, fendilhação na camada de sub-base com comportamento equivalente a granular e por fim fendilhação em camada de base e sub-base ambas com comportamento equivalente a granular.

Como tal e por forma a simplificar a análise efetuada, na verificação estrutural dos catálogos D5 e W5, correspondentes a secção com camada de base em misturas betuminosas e camada de sub-base estabilizada com cimento, avaliou-se apenas o cenário sem fendilhação, não sendo contabilizada a vida útil do pavimento considerando a camada de sub-base estabilizada com comportamento equivalente a um material granular em fase fendilhada.

5.2 Modelos estruturais

A definição geométrica das estruturas e os tipos de materiais correspondem às estruturas apresentadas nos catálogos (ver Anexo I – 144 modelos estruturais). Sendo que o catálogo SATCC (CSIR, 1998) apenas indica espessuras e tipos de materiais para cada secção, é necessário definir as propriedades dos materiais de modo a poder-se realizar uma análise mecanicista. Para cada secção do catálogo (72 secções) adotaram-se dois modelos de análise estrutural:

- Modelo SAPEM – As propriedades adotadas seguem o indicado no manual SAPEM (SANRAL, 2014);
- Modelo Metodologia Portuguesa – As propriedades adotadas seguem o indicado em 2.

Em ambos os modelos de análise, SAPEM e Metodologia Portuguesa, consideraram-se os seguintes pressupostos:

- O solo de fundação como um meio semi-infinito, sendo o valor do módulo de deformabilidade do solo de fundação dado pela equação de Powell, em função do valor médio de CBR da classe de solos correspondente (equação 2.9);
- O solo em camada selecionada com um CBR embebido em água superior a 15%, correspondendo a um material do tipo G7 (Tabela 3.11);
- Os valores de coeficiente de Poisson dos materiais indicados em manual SAPEM (SANRAL, 2014) dado estarem dentro dos valores usualmente adotados no projeto de pavimentos em Portugal (capítulo 2);
- Os módulos de deformabilidade das misturas betuminosas, quer em camada de desgaste, quer em camada de base, foram definidos com base na metodologia indicada na secção 2.6.1.1.3, adotando-se um valor de temperatura equivalente anual ponderada de 21,4°C correspondente ao valor registado na cidade de Namibe, Angola, de acordo com as normais climatológicas, INAMET (2016), Tabela 5.1 e Figura 5.1 e uma velocidade de projeto de 50 km/h;
- Apesar da região em questão ser uma região seca de acordo com manual SATCC (CSIR, 1998), considerou-se a mesma temperatura ponderada anual do ar na verificação das estruturas de catálogo correspondentes à região húmida;

6 Considerações Finais

- Adotou-se o procedimento usualmente considerado em Portugal definindo a temperatura de projeto das misturas betuminosas a meio da espessura da camada em análise, de acordo com o indicado na secção 2.4.1;
- Considerou-se uma classe de betume do tipo 35/50, sendo que no manual SAPEM (SANRAL, 2013) é indicado que os betumes tradicionais, usualmente adotados na África do Sul, são das classes 35/50 e 60/70;
- Adotou-se o critério de deformação permanente em solos de fundação, no topo do solo de fundação e no topo da camada com solos selecionados nas secções em que esta camada é adotada;
- Nas estruturas de pavimento com camada de base e sub-base granular (D1 e W1) adotou-se uma camada delgada com 0,02 m de espessura e um módulo de deformabilidade de 600 MPa, correspondente a um revestimento superficial. Nos restantes catálogos (D4, W4, D5 e W5) não se considerou esta camada na análise, sendo apenas considerada a espessura relativa à camada inferior em misturas betuminosas.

Tabela 5.1 – Cálculo da temperatura de projeto para a estação climatológica de Namibe (Angola) - normais climatológicas, INAMET (2016)

Mês	Temperatura média mensal do ar (°C)	Fatores de ponderação
Janeiro	22,8	1,487
Fevereiro	23,7	1,671
Março	24,4	1,836
Abril	23,8	1,707
Maio	20,8	1,152
Junho	18,7	0,862
Julho	17,4	0,723
Agosto	17,9	0,773
Setembro	19,2	0,929
Outubro	20,9	1,162
Novembro	22,0	1,350
Dezembro	22,3	1,398
Temperatura média anual do ar (°C)	21,1	
Fator de ponderação médio	1,254	
Temperatura média anual do ar ponderada (°C)	21,4	

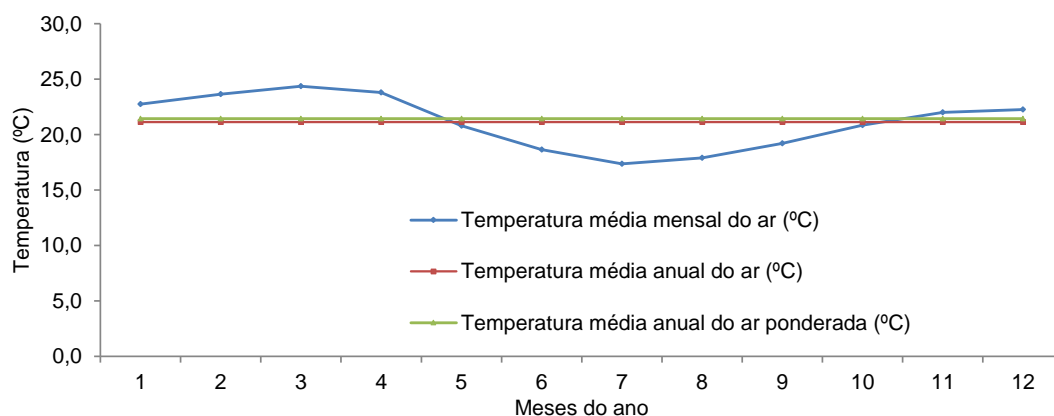


Figura 5.1 – Temperatura de projeto para a estação climatológica localizada na cidade de Namibe, Angola

5.2.1 Modelo SAPEM

No modelo SAPEM adotaram-se para as camadas granulares os valores dos módulos de deformabilidade indicados na Tabela 3.12, em função das características da camada de suporte. Admitiu-se que o material granular indicado no manual SATCC (CSIR, 1998) com um valor de CBR superior a 30%, corresponde a um material G6 (Tabela 3.12). Assumiu-se que o material granular em camada de base indicado no manual SATCC (CSIR, 1998) com um valor de CBR superior a 80% corresponde a um material G2 (Tabela 3.12).

Admitiu-se que a camada estabilizada com cimento com um valor de compressão uniaxial aos 7 dias entre 1,5 MPa e 3,0 MPa corresponde à estrutura C3 do SAPEM (SANRAL, 2014). Na metodologia Sul-africana optou-se por considerar que a camada de desgaste corresponde uma mistura betuminosa contínua.

Com base no modelo SAPEM realizaram-se duas verificações estruturais de acordo com os princípios expostos no capítulo 3 (metodologia Sul-africana):

- Nível de confiança de 95% (categoria A) – De acordo com o SAPEM (SANRAL, 2014) é o critério adequado às secções em análise, tendo em conta os valores limite do número de passagens de eixos padrão equivalentes de 80 kN das classes de tráfego T6 a T8 no SATCC (CSIR, 1998), entre $6,0 \times 10^6$ e $30,0 \times 10^6$, ver Tabela 3.1;
- Nível de confiança de 50% (categoria D) - Nesta verificação, admitiram-se os critérios de dimensionamento menos exigentes indicados no manual SAPEM (SANRAL, 2014), de modo a ficar-se com uma noção relativa aos graus de exigência estrutural das várias categorias preconizadas no manual.

Adotou-se o eixo padrão equivalente de 80 kN com uma pressão de enchimento de 0,52 MPa, ver Tabela 3.3, que corresponde à configuração de eixo padrão equivalente adotada na definição do catálogo TRH4 (1996), em vigor na África do Sul aquando da elaboração do manual SATCC (CSIR, 1998). Adotaram-se os critérios de dimensionamento indicados em 3.7. É ainda de referir que atualmente a pressão de enchimento admissível em projetos na África do Sul é de 0,65 MPa, sendo assim ligeiramente mais condicionante e limitativa que a abordagem adotada.

5.2.1 Modelo Metodologia Portuguesa

No modelo relativo à metodologia Portuguesa optou-se por definir o módulo de deformabilidade das camadas granulares com base na equação 2.11, adotando uma redução de 25% no valor do módulo da camada granular de sub-base em materiais naturais e uma redução de 5% no valor do módulo para a camada granular de base em materiais britados, considerando-se um valor máximo de módulo de deformabilidade de 400 MPa.

Admitiu-se que a camada estabilizada com cimento com um valor de compressão uniaxial aos 7 dias entre 1,5 MPa e 3,0 MPa apresenta uma resistência de tração em flexão aos 28 dias de 0,5 MPa e um coeficiente α de 0,08. Adotou-se o módulo de deformabilidade indicado em SAPEM (SANRAL, 2014) para uma estrutura do tipo C3.

Na verificação estrutural realizada segundo a abordagem empírico-mecanicista usualmente adotada em Portugal (capítulo 2), adotou-se o eixo padrão equivalente de 80 kN indicado na Tabela 2.4 e os critérios de dimensionamento indicados em 2.7.

5.3 Catálogo D1

Nas Figuras I. 1 a I. 8 do Anexo I apresentam-se as estruturas de pavimento adotadas nas verificações estruturais realizadas (classes de solo S2 a S5 e classes de tráfego T6 a T8) referentes ao catálogo D1. O número de ciclos admissíveis obtido para cada critério de dimensionamento, em função do tipo de material e da metodologia adotada é apresentado nas Figuras II. 1 a II. 8. Apenas se apresentam de forma detalhada as verificações estruturais efetuadas com base no manual SAPEM (SANRAL, 2014) para um nível de confiança de 95%.

Nas Figuras 5.2 e 5.3 apresenta-se, de forma gráfica, um resumo da verificação estrutural realizada, indicando-se para cada classe de solo e para cada classe de tráfego, os valores do número máximo de eixos padrão equivalentes admitidos em cada modelo, respetivamente para a metodologia proposta em SAPEM (SANRAL, 2014), categorias A e D, e para a metodologia usualmente adotada em Portugal. Indicam-se igualmente os valores limite do número de passagens de eixo-padrão equivalente de 80 kN correspondentes às classes de tráfego T6 ($6,0 \times 10^6$ a $10,0 \times 10^6$), T7 ($10,0 \times 10^6$ a $17,0 \times 10^6$) e T8 ($17,0 \times 10^6$ a $30,0 \times 10^6$).

Da análise das Figuras 5.2 e 5.3, verifica-se que, para as condições de temperatura equivalente anual e para os valores de módulo de deformabilidade adotados, nenhuma das estruturas propostas no SATCC (CSIR, 1998) é verificada com base em modelos empírico-mecanicistas. Verifica-se também que os critérios de dimensionamento propostos na metodologia empírico-mecanicista Sul-africana (Categoria A) são mais exigentes que os critérios de dimensionamento usualmente adotados em Portugal.

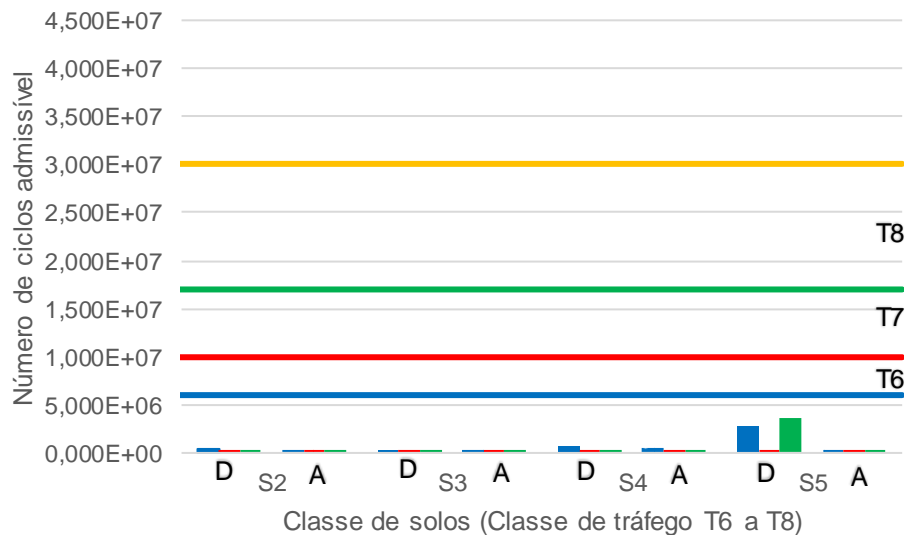


Figura 5.2 – Verificação das estruturas do catálogo SATCC com base no SAPEM – Catálogo D1 – Classes de fundação S2 a S5 e classes de tráfego T6 a T8 – Categorias D e A

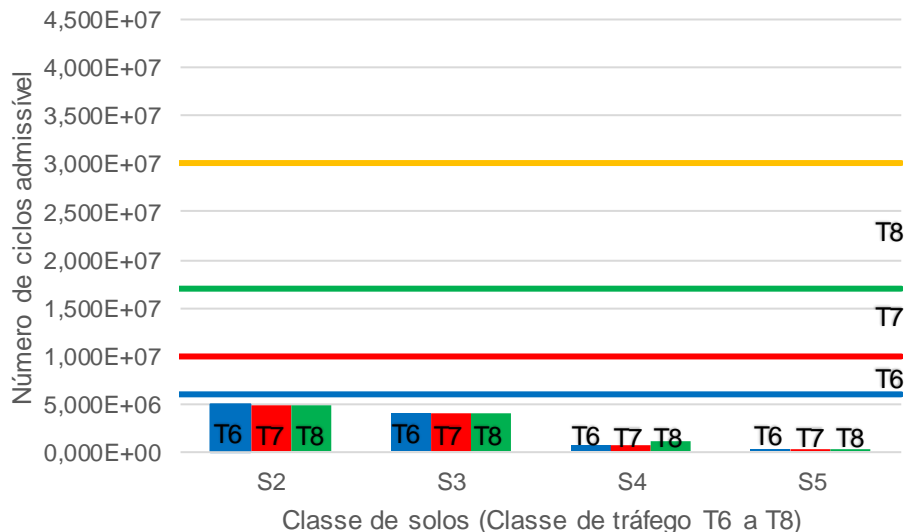


Figura 5.3 – Verificação das estruturas do catálogo SATCC com base na metodologia Portuguesa – Catálogo D1 – Classes de fundação S2 a S5 e classes de tráfego T6 a T8

Na Tabela 5.2 apresentam-se os critérios de dimensionamento que não cumprem os valores limite de passagens de eixo-padrão equivalente em cada metodologia. Verifica-se que, para as

6 Considerações Finais

estruturas em análise, o critério de fadiga nas misturas betuminosas e o critério de deformação permanente nas camadas granulares são, para esta estrutura, os mais condicionantes na abordagem Sul-africana. Na metodologia Portuguesa os critérios mais condicionantes são o critério de fadiga nas misturas betuminosas e/ou critério de deformação permanente nos solos de fundação.

Tabela 5.2 – Verificação estrutural do catálogo D1 – Critérios de dimensionamento condicionantes

	T6			T7			T8		
Classe de fundação	SAPEM (2014) - D	SAPEM (2014) - A	Met. Portuguesa	SAPEM (2014) - D	SAPEM (2014) - A	Met. Portuguesa	SAPEM (2014) - D	SAPEM (2014) - A	Met. Portuguesa
S2 (CBR 3%-4%)									
S3 (CBR 5%-7%)									
S4 (CBR 8%-14%)									
S5 (CBR 15%-29%)									

Legenda		Fadiga nas misturas betuminosas
		Fadiga nas misturas betuminosas e deformação permanente no solo de fundação
		Deformação permanente na camada granular
		Deformação permanente no solo de fundação

Na Figura III. 1 do Anexo III apresenta-se em forma de tabela, para cada metodologia adotada e para cada solução estrutural, o acréscimo de espessura em misturas betuminosas de modo a que as estruturas do catálogo SATCC verifiquem o valor máximo de passagens equivalentes da classe de tráfego correspondente.

5.4 Catálogo D4

Nas Figuras I. 9 a I. 16 do Anexo I apresentam-se as estruturas de pavimento adotadas nas verificações estruturais realizadas (classes de solo S2 a S5 e classes de tráfego T6 a T8) referentes ao catálogo D4. O número de ciclos admissíveis obtido para cada critério de dimensionamento, em função do tipo de material e da metodologia adotada é apresentado nas Figuras II. 9 a II. 16. Apenas se apresentam de forma detalhada as verificações estruturais efetuadas com base no manual SAPEM (SANRAL, 2014) para um nível de confiança de 95%.

Nas Figuras 5.4 e 5.5 apresenta-se, de forma gráfica, um resumo da verificação estrutural realizada, indicando-se para cada classe de solo e para cada classe de tráfego, os valores do número máximo de ciclos de eixos padrão equivalentes admitidos em cada modelo, respetivamente para a metodologia proposta em SAPEM (SANRAL, 2014), categorias A e D, e para a metodologia usualmente adotada em Portugal.

Da análise das Figuras 5.4 e 5.5, verifica-se que, para as condições de temperatura equivalente anual e para os valores de módulo de deformabilidade adotados, nenhuma das estruturas propostas no SATCC (CSIR, 1998) é verificada com base nas metodologias empírico-

mecanicista Portuguesa e Sul-africana (Categoria A). Identifica-se que algumas das estruturas do catálogo SATCC (CSIR, 1998) verificam estruturalmente caso se adote o critério menos exigente da metodologia empírico-mecanicista Sul-africana (categoria D). Verifica-se igualmente que os critérios de dimensionamento propostos na metodologia empírico-mecanicista Sul-africana (Categoria A) são mais exigentes que os critérios de dimensionamento usualmente adotados em Portugal.

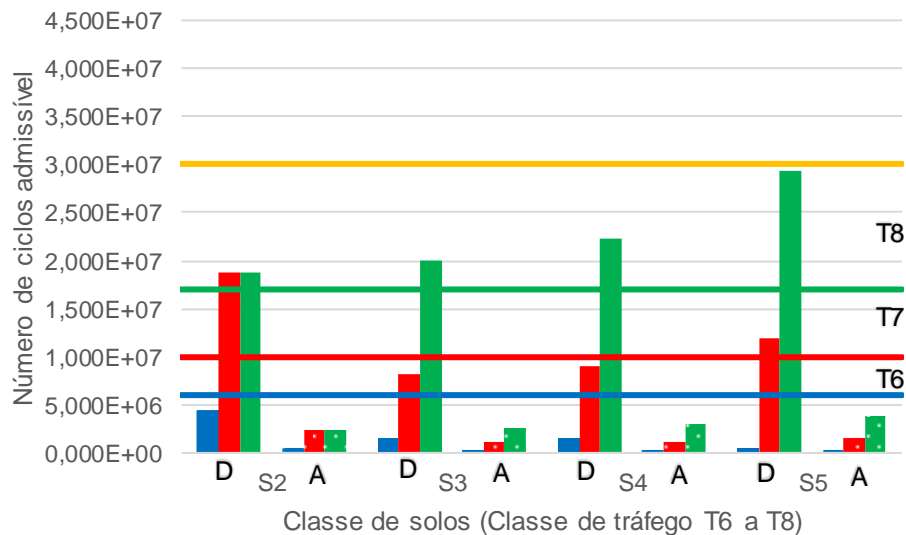


Figura 5.4 – Verificação das estruturas do catálogo SATCC com base no SAPEM – Catálogo D4 – Classes de fundação S2 a S5 e classes de tráfego T6 a T8 – Categorias D e A

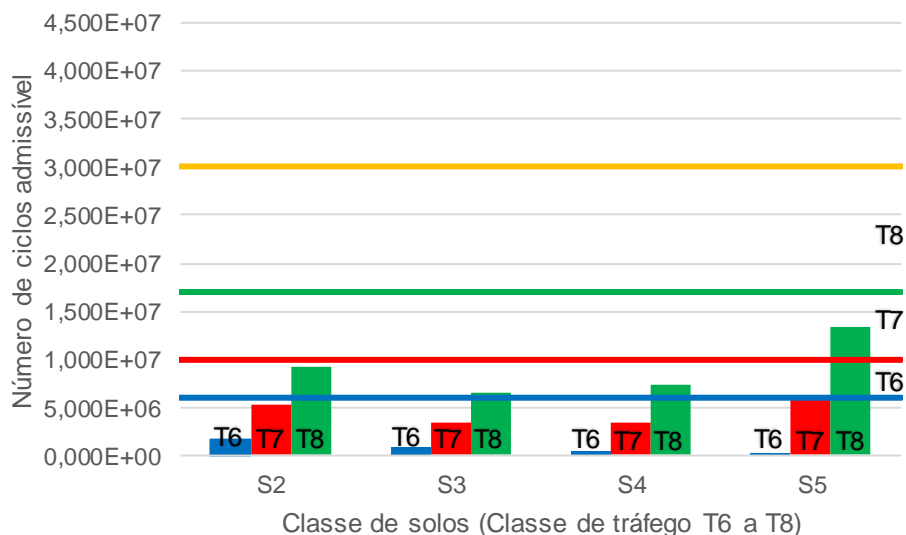


Figura 5.5 – Verificação das estruturas do catálogo SATCC com base na metodologia Portuguesa – Catálogo D4 – Classes de fundação S2 a S5 e classes de tráfego T6 a T8

6 Considerações Finais

Na Tabela 5.3 apresentam-se os critérios de dimensionamento que não cumprem os valores limite de passagens de eixo-padrão equivalente em cada metodologia. Verifica-se que para as estruturas em análise o critério de fadiga nas misturas betuminosas é em geral o critério mais condicionante na abordagem Sul-africana (Categorias A e D). Na metodologia Portuguesa os critérios mais condicionantes são a fadiga em misturas betuminosas e a deformação permanente nos solos de fundação.

Tabela 5.3 – Verificação estrutural do catálogo D4 – Critérios de dimensionamento condicionantes

Classe de fundação	T6			T7			T8		
	SAPEM (2014) - D	SAPEM (2014) - A	Met. Portuguesa	SAPEM (2014) - D	SAPEM (2014) - A	Met. Portuguesa	SAPEM (2014) - D	SAPEM (2014) - A	Met. Portuguesa
S2 (CBR 3%-4%)				✓			✓		
S3 (CBR 5%-7%)							✓		
S4 (CBR 8%-14%)							✓		
S5 (CBR 15%-29%)				✓			✓		

Legenda

- Fadiga nas misturas betuminosas
- Fadiga nas misturas betuminosas e deformação permanente na camada granular
- Fadiga nas misturas betuminosas e deformação permanente no solo de fundação
- ✓ Verifica pelo menos para o valor mínimo da classe de tráfego

Na Figura III. 2 do Anexo III apresenta-se em forma de tabela, para cada metodologia adotada e para cada solução estrutural, o acréscimo de espessura em misturas betuminosas de modo a que as estruturas do catálogo SATCC verifiquem o valor máximo de passagens equivalentes da classe de tráfego correspondente.

5.5 Catálogo D5

Nas Figuras I. 17 a I. 24 do Anexo I apresentam-se as estruturas de pavimento adotadas nas verificações estruturais realizadas (classes de solo S2 a S5 e classes de tráfego T6 a T8) referentes ao catálogo D5. O número de ciclos admissíveis obtido para cada critério de dimensionamento, em função do tipo de material e da metodologia adotada é apresentado nas Figuras II. 17 a II. 24. Apenas se apresentam de forma detalhada as verificações estruturais efetuadas com base no manual SAPEM (SANRAL, 2014) para um nível de confiança de 95%.

Nas Figuras 5.6 e 5.7 apresenta-se, de forma gráfica, um resumo da verificação estrutural realizada, indicando-se para cada classe de solo e para cada classe de tráfego, os valores do número máximo de ciclos de eixos padrão equivalentes admitidos em cada modelo, respetivamente para a metodologia proposta em SAPEM (SANRAL, 2014), categorias A e D, e para metodologia usualmente adotada em Portugal.

Da análise das Figuras 5.6 e 5.7, verifica-se que, para as condições de temperatura anual equivalente e para os valores de módulo de deformabilidade adotados, as estruturas propostas no SATCC (CSIR, 1998) S2-T6, T7 e T8, S3-T7 e T8 e S4-T8 são verificadas com base no

modelo empírico-mecanicista usualmente adotado em Portugal. Verifica-se ainda que a estrutura S3-T7, verificam o valor mínimo da classe de tráfego para o modelo Sul-africano (Categoria A). Na análise realizada com a metodologia Sul-africana (categoria D) identifica-se que as estruturas propostas no SATCC (CSIR, 1998) S2-T6, T7 e T8 e S3-T6 e T7 são verificadas estruturalmente. Verifica-se igualmente que os critérios de dimensionamento propostos na metodologia empírico-mecanicista Sul-africana (categoria A) são mais exigentes que os critérios de dimensionamento usualmente adotados em Portugal.

Verifica-se ainda (Figuras II. 17 a II. 24) que, para a metodologia Sul-africana os critérios de dimensionamento de deformação permanente indicativos do início de esmagamento em materiais estabilizados revelam valores admissíveis da ordem de grandeza dos valores indicados pelo critério de fadiga.

Nas verificações estruturais apresentadas contabilizou-se a vida útil em fase não fendilhada e a vida útil em fase fendilhada (camada estabilizada com cimento como sendo equivalente a uma camada granular). Admitiu-se assim, de forma simplificada, que a camada estabilizada com cimento ao fendilhar não potencia o aparecimento de fendilhação na camada superior em misturas betuminosas.

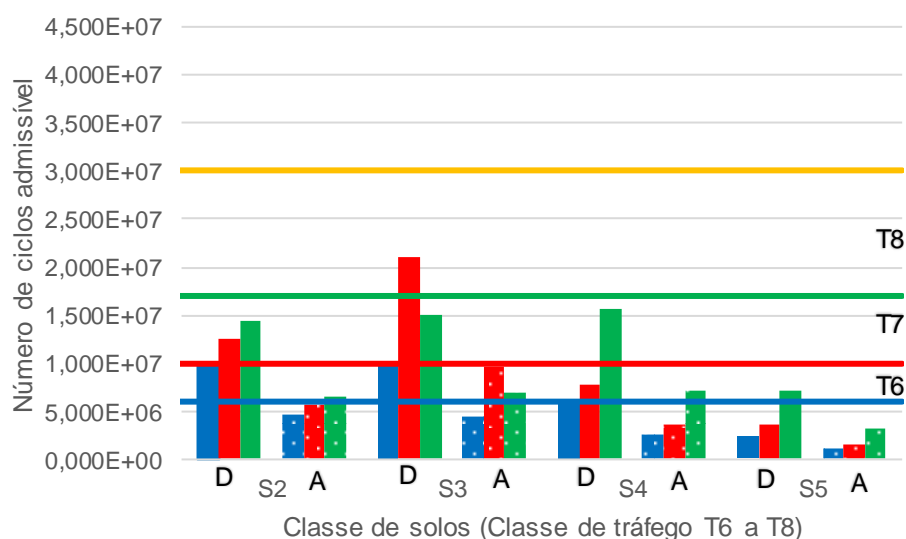


Figura 5.6 – Verificação das estruturas do catálogo SATCC com base no SAPEM – Catálogo D5 – Classes de fundação S2 a S5 e classes de tráfego T6 a T8 – Categorias D e A

6 Considerações Finais

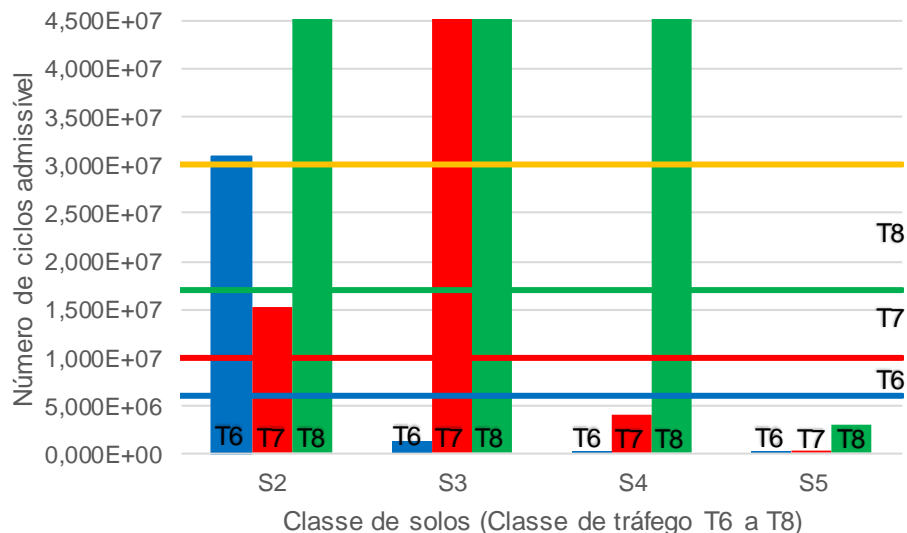


Figura 5.7 – Verificação das estruturas do catálogo SATCC com base na metodologia Portuguesa – Catálogo D5 – Classes de fundação S2 a S5 5 classes de tráfego T6 a T8

Na Tabela 5.4 apresentam-se os critérios de dimensionamento para os quais se obtêm valores limite de passagens de eixo-padrão equivalente mais condicionantes em cada metodologia. Nas estruturas que não verificam o dimensionamento, o critério de fadiga nas camadas granulares estabilizadas com cimento é o critério mais condicionante nas diferentes abordagens adotadas.

Tabela 5.4 – Verificação estrutural do catálogo D5 – Critérios de dimensionamento condicionantes

Classe de fundação	T6			T7			T8		
	SAPEM (2014) - D	SAPEM (2014) - A	Met. Portuguesa	SAPEM (2014) - D	SAPEM (2014) - A	Met. Portuguesa	SAPEM (2014) - D	SAPEM (2014) - A	Met. Portuguesa
S2 (CBR 3%-4%)	✓		✓	✓		✓			✓
S3 (CBR 5%-7%)	✓			✓	✓	✓			✓
S4 (CBR 8%-14%)									✓
S5 (CBR 15%-29%)									

Legenda

Fadiga na camada de sub-base estabilizada com cimento

✓ Verifica pelo menos para o valor mínimo da classe de tráfego

Na Figura III. 3 do Anexo III apresenta-se em forma de tabela, para cada metodologia adotada e para cada solução estrutural, o acréscimo de espessura em misturas betuminosas de modo a que as estruturas do catálogo SATCC verifiquem o valor máximo de passagens equivalentes da classe de tráfego correspondente.

5.6 Catálogo W1

Nas Figuras I. 25 a I. 32 do Anexo I apresentam-se as estruturas de pavimento adotadas nas verificações estruturais realizadas (classes de solo S2 a S5 e classes de tráfego T6 a T8) referentes ao catálogo W1. O número de ciclos admissíveis obtido para cada critério de

dimensionamento, em função do tipo de material e da metodologia adotada é apresentado nas Figuras II. 25 a II. 32. Apenas se apresentam de forma detalhada as verificações estruturais efetuadas com base no manual SAPEM (SANRAL, 2014) para um nível de confiança de 95%.

Nas Figuras 5.8 a 5.9 apresenta-se, de forma gráfica, um resumo da verificação estrutural realizada, indicando-se para cada classe de solo e para cada classe de tráfego, os valores do número máximo de ciclos de eixos padrão equivalentes admitidos em cada modelo, respetivamente para a metodologia proposta em SAPEM (SANRAL, 2014), categorias A e D, e para a metodologia usualmente adotada em Portugal.

Da análise das Figuras 5.8 a 5.9, verifica-se que para as condições de temperatura equivalente anual adotada e para os valores de módulo de deformabilidade adotados, nenhuma das estruturas propostas no SATCC (CSIR, 1998) é verificada com base em modelos empírico-mecanicistas. Verifica-se igualmente que os critérios de dimensionamento propostos na metodologia empírico-mecanicista Sul-africana (categoria A) são mais exigentes que os critérios de dimensionamento usualmente adotados em Portugal.

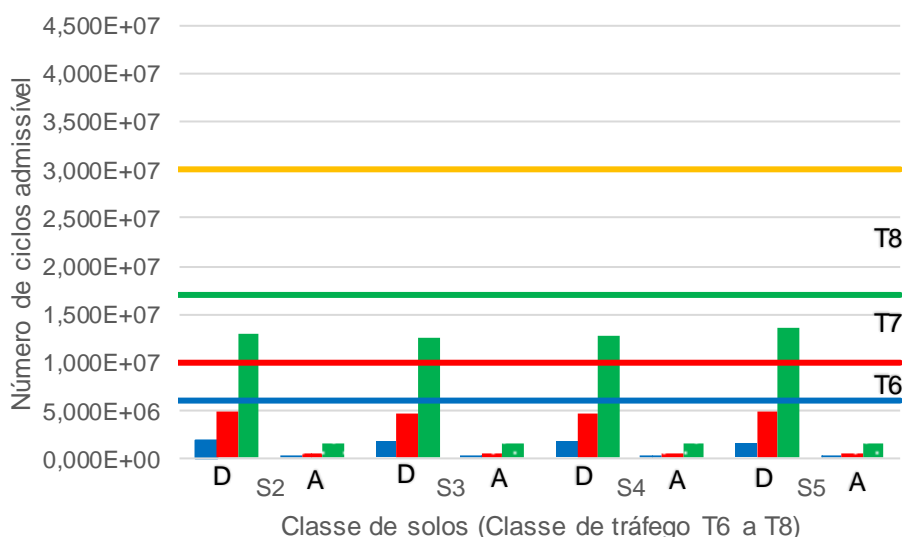


Figura 5.8 – Verificação das estruturas do catálogo SATCC com base no SAPEM – Catálogo W1 – Classes de fundação S2 a S5 e classes de tráfego T6 a T8 – Categorias D e A

6 Considerações Finais

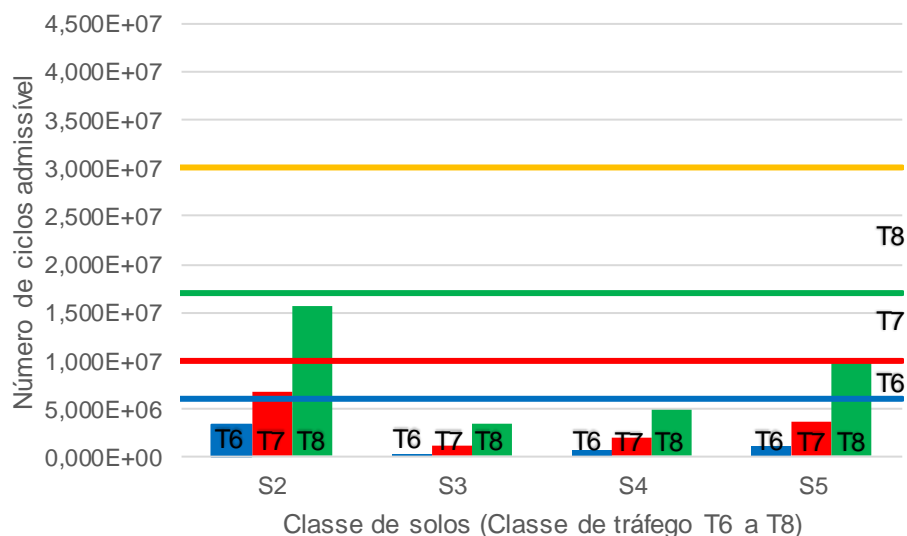


Figura 5.9 – Verificação das estruturas do catálogo SATCC com base na metodologia Portuguesa – Catálogo W1 – Classes de fundação S2 a S5 e classes de tráfego T6 a T8

Na Tabela 5.5 apresentam-se os critérios de dimensionamento que não cumprem os valores limite de passagens de eixo-padrão equivalente para cada metodologia. Verifica-se que os critérios de fadiga nas misturas betuminosas e de deformação permanente nas camadas granulares são os mais condicionantes na abordagem Sul-africana (categoria A). Na metodologia Portuguesa os critérios mais condicionantes são o critério de fadiga nas misturas betuminosas e/ou critério de deformação permanente nos solos de fundação.

Admite-se que na metodologia Sul-africana o controle de deformação permanente na camada granular compensa o facto de o controlo da deformação permanente no solo de fundação ser menos exigente do que na metodologia Portuguesa.

Tabela 5.5 – Verificação estrutural do catálogo W1 – Critérios de dimensionamento condicionantes

Classe de fundação	T6			T7			T8		
	SAPEM (2014) - D	SAPEM (2014) - A	Met. Portuguesa	SAPEM (2014) - D	SAPEM (2014) - A	Met. Portuguesa	SAPEM (2014) - D	SAPEM (2014) - A	Met. Portuguesa
S2 (CBR 3%-4%)									
S3 (CBR 5%-7%)									
S4 (CBR 8%-14%)									
S5 (CBR 15%-29%)									

Legenda	
	Fadiga nas misturas betuminosas
	Fadiga nas misturas betuminosas e deformação permanente na camada granular
	Fadiga nas misturas betuminosas e deformação permanente no solo de fundação

Na Figura III. 4 do Anexo III apresenta-se em forma de tabela, para cada metodologia adotada e para cada solução estrutural, o acréscimo de espessura em misturas betuminosas de modo a que as estruturas do catálogo SATCC verifiquem o valor máximo de passagens equivalentes da classe de tráfego correspondente.

5.7 Catálogo W4

Nas Figuras I. 33 a I. 40 do Anexo I apresentam-se as estruturas de pavimento adotadas nas verificações estruturais realizadas (classes de solo S2 a S5 e classes de tráfego T6 a T8) referentes ao catálogo W4. O número de ciclos admissíveis obtido para cada critério de dimensionamento, em função do tipo de material e da metodologia adotada é apresentado nas Figuras II. 33 a II. 40. Apenas se apresentam de forma detalhada as verificações estruturais efetuadas com base no manual SAPEM (SANRAL, 2014) para um nível de confiança de 95%.

Nas Figuras 5.10 e 5.11, apresenta-se, de forma gráfica, um resumo da verificação estrutural realizada, indicando-se para cada classe de solo e para cada classe de tráfego, os valores do número máximo de ciclos de eixos padrão equivalentes admitidos em cada modelo para, respetivamente, a metodologia proposta em SAPEM (SANRAL, 2014), categorias A e D, e a metodologia usualmente adotada em Portugal.

Da análise das Figuras 5.10 e 5.11, verifica-se que, para as condições de temperatura equivalente anual adotada e para os valores de módulo de deformabilidade adotados, as estruturas propostas no SATCC (CSIR, 1998) S2-T6 a T8, S3-T6 a T-8 e S4-T7 a T8 cumprem com base no modelo empírico-mecanicista usualmente adotado em Portugal, os valores limite mínimos das classes de tráfego correspondentes. As estruturas propostas no SATCC (CSIR, 1998) não cumprem com base no modelo empírico-mecanicista Sul-africano (categoria A), os valores limite mínimos das classes de tráfego correspondentes. Somente a estrutura proposta no SATCC (CSIR, 1998) S5-T6 é que não cumpre com base no modelo empírico-mecanicista Sul-africano (categoria D), os valores limite mínimos das classes de tráfego correspondentes. Verifica-se igualmente que os critérios de dimensionamento propostos na metodologia empírico-mecanicista Sul-africana são mais exigentes que os critérios de dimensionamento usualmente adotados em Portugal.

Na Tabela 5.6 apresentam-se os critérios de dimensionamento que não cumprem os valores limite de passagens de eixo-padrão equivalente em cada metodologia. Verifica-se também que, para as estruturas em análise, os critérios de fadiga em misturas betuminosas e de deformação permanente nos solos de fundação são os mais condicionantes na metodologia Portuguesa. Na metodologia Sul-africana o critério mais condicionante é o critério de fadiga na base das misturas betuminosas.

Na Figura III. 5 do Anexo III apresenta-se em forma de tabela, para cada metodologia adotada e para cada solução estrutural, o acréscimo de espessura em misturas betuminosas de modo a

6 Considerações Finais

que as estruturas do catálogo SATCC verifiquem o valor máximo de passagens equivalentes da classe de tráfego correspondente.

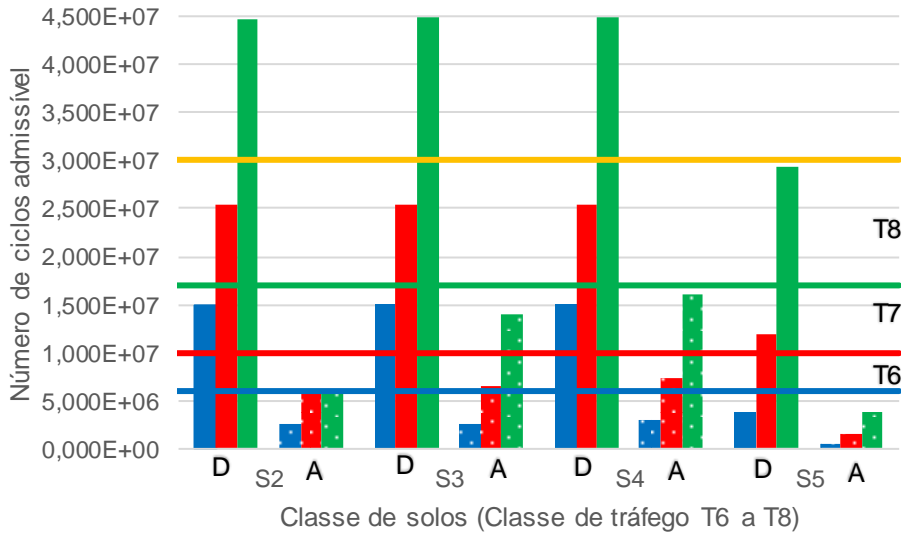


Figura 5.10 – Verificação das estruturas do catálogo SATCC com base no SAPEM – Catálogo W4 – Classes de fundação S2 a S5 e classes de tráfego T6 a T8 – Categorias D e A

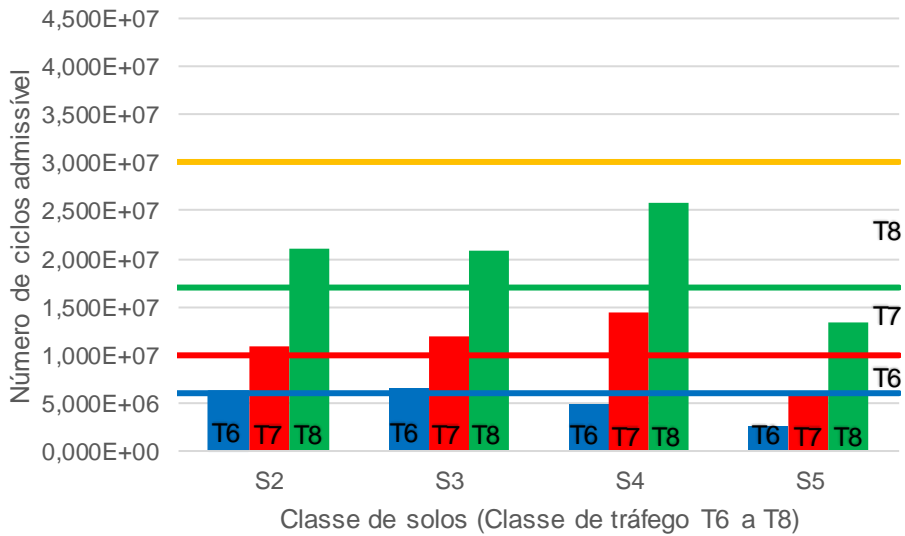


Figura 5.11 – Verificação das estruturas do catálogo SATCC com base na metodologia Portuguesa – Catálogo W4 – Classes de fundação S2 a S5 e classes de tráfego T6 a T8

Tabela 5.6 – Verificação estrutural do catálogo W4 – Critérios de dimensionamento condicionantes

Classe de fundação	T6			T7			T8		
	SAPEM (2014) - D	SAPEM (2014) - A	Met. Portuguesa	SAPEM (2014) - D	SAPEM (2014) - A	Met. Portuguesa	SAPEM (2014) - D	SAPEM (2014) - A	Met. Portuguesa
S2 (CBR 3%-4%)	✓		✓	✓		✓	✓		✓
S3 (CBR 5%-7%)	✓		✓	✓		✓	✓		✓
S4 (CBR 8%-14%)	✓			✓		✓	✓		✓
S5 (CBR 15%-29%)				✓			✓		

Legenda

	Fadiga nas misturas betuminosas
	Fadiga nas misturas betuminosas e deformação permanente na camada granular
	Fadiga nas misturas betuminosas e deformação permanente no solo de fundação
✓	Verifica pelo menos para o valor mínimo da classe de tráfego

5.8 Catálogo W5

Nas Figuras I. 41 a I. 48 do Anexo I apresentam-se as estruturas de pavimento adotadas nas verificações estruturais realizadas (classes de solo S2 a S5 e classes de tráfego T6 a T8) referentes ao catálogo W5. O número de ciclos admissíveis obtido para cada critério de dimensionamento, em função do tipo de material e da metodologia adotada é apresentado nas Figuras II. 41 a II. 48. Apenas se apresentam de forma detalhada as verificações estruturais efetuadas com base no manual SAPEM (SANRAL, 2014) para um nível de confiança de 95%.

Nas Figuras 5.12 e 5.13 apresenta-se, de forma gráfica, um resumo da verificação estrutural realizada, indicando-se para cada classe de solo para cada classe de tráfego os valores do número máximo de ciclos de eixos padrão equivalentes admitidos em cada modelo para, respetivamente, a metodologia proposta em SAPEM (SANRAL, 2014), categorias A e D, e a metodologia usualmente adotada em Portugal.

Da análise das Figuras 5.12 e 5.13, verifica-se que, para as condições de temperatura equivalente anual adotada e para os valores de módulo de deformabilidade adotados, as estruturas propostas no SATCC (CSIR, 1998) S2-T6 a T8, S3-T6 a T8 e S4-T6 a T8 e S5-T8 são verificadas em com base no modelo empírico-mecanicista usualmente adotado em Portugal. Verifica-se ainda que as estruturas S3-T6 a T8 e S4-T6, verificam o valor mínimo da classe de tráfego para o modelo Sul-africano (categoria A). Constata-se ainda que as estruturas S2-T8, S4-T8 e S5-T6 a T8, não verificam o valor mínimo da classe de tráfego para o modelo Sul-africano (categoria D). Verifica-se igualmente que os critérios de dimensionamento propostos na metodologia empírico-mecanicista Sul-africana são mais exigentes que os critérios de dimensionamento usualmente adotados em Portugal.

Verifica-se ainda (Figura II. 42 a II. 48) para a metodologia Sul-africana (categoria A), os critérios de dimensionamento de deformação permanente indicativos do início de esmagamento em materiais estabilizados indicam valores admissíveis da ordem de grandeza dos valores indicados pelo critério de fadiga.

6 Considerações Finais

Nas verificações estruturais apresentadas contabilizou-se a vida útil em fase não fendilhada e a vida útil em fase fendilhada (camada estabilizada com cimento como sendo equivalente a uma camada granular). Admitiu-se assim, de forma simplificada, que a camada estabilizada com cimento ao fendilhar não potencia o aparecimento de fendilhação na camada superior em misturas betuminosas.

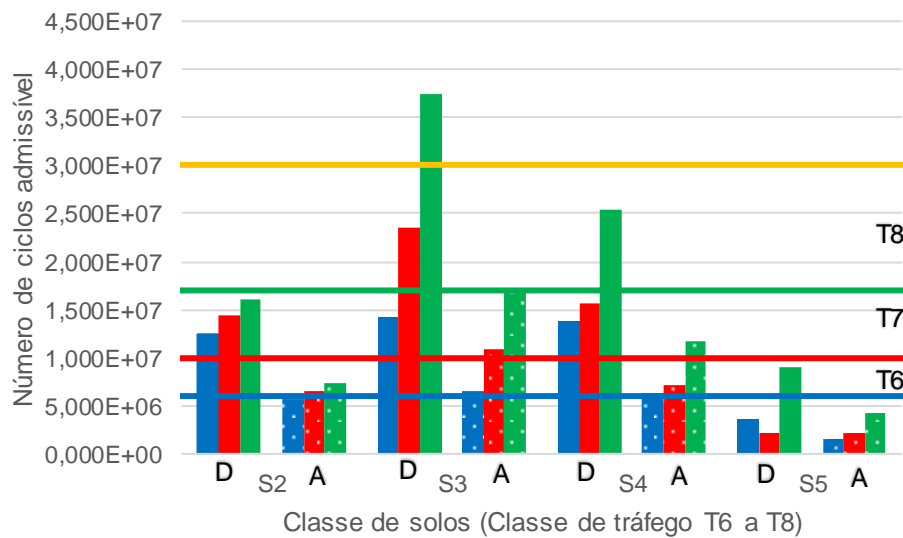


Figura 5.12 – Verificação das estruturas do catálogo SATCC com base no SAPEM – Catálogo W5 – Classes de fundação S2 a S5 e classes de tráfego T6 a T8 – Categorias D e A

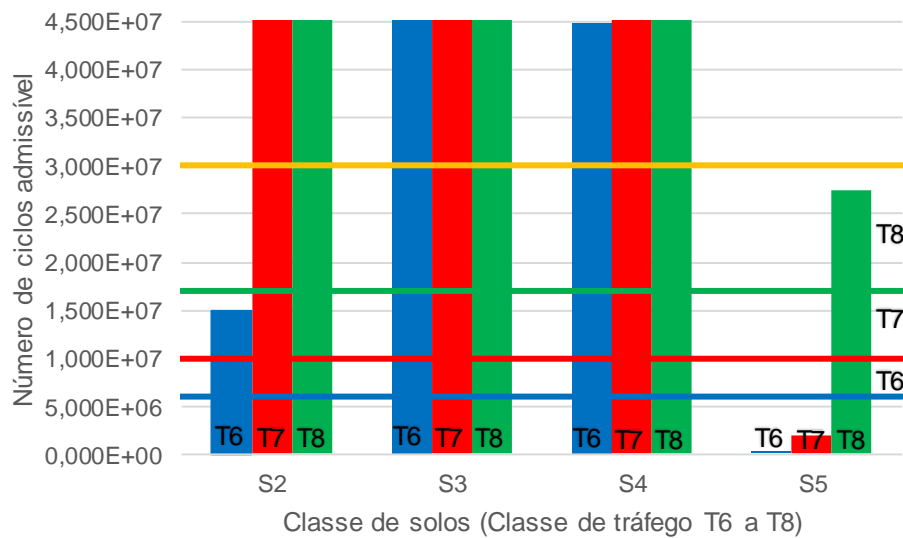


Figura 5.13 – Verificação das estruturas do catálogo SATCC com base na metodologia Portuguesa – Catálogo W5 – Classes de fundação S2 a S5 e classes de tráfego T6 a T8

Na


Tabela 5.7 apresentam-se os critérios de dimensionamento para os quais se obtêm valores limite de passagens de eixo-padrão equivalente mais condicionantes em cada metodologia. Nas

estruturas que não verificam o dimensionamento, o critério de fadiga nas camadas granulares estabilizadas com cimento é o critério mais condicionante nas diferentes abordagens adotadas.

Tabela 5.7 – Verificação estrutural do catálogo D5 – Critérios de dimensionamento condicionantes

Classe de fundação	T6			T7			T8		
	SAPEM (2014) - D	SAPEM (2014) - A	Met. Portuguesa	SAPEM (2014) - D	SAPEM (2014) - A	Met. Portuguesa	SAPEM (2014) - D	SAPEM (2014) - A	Met. Portuguesa
S2 (CBR 3%-4%)	✓		✓	✓		✓			✓
S3 (CBR 5%-7%)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓
S4 (CBR 8%-14%)	✓	✓	✓	✓		✓			✓
S5 (CBR 15%-29%)									✓

Legenda

 Fadiga na camada de sub-base estabilizada com cimento

✓ Verifica pelo menos para o valor mínimo da classe de tráfego

Na Figura III. 6 do Anexo III apresenta-se em forma de tabela, para cada metodologia adotada e para cada solução estrutural, o acréscimo de espessura em misturas betuminosas de modo a que as estruturas do catálogo SATCC verifiquem o valor máximo de passagens equivalentes da classe de tráfego correspondente.

5.9 Conclusões

As secções definidas no catálogo de estruturas SATCC para região seca são muito menos conservativas que as estruturas definidas para região húmida. Assim, conclui-se que em região seca, as secções de catálogo requerem um excelente desempenho dos materiais de pavimentação, em especial das camadas granulares e do solo de fundação.

Para as secções analisadas, verifica-se que, quando se consideram propriedades das misturas betuminosas em função da temperatura ponderada anual do ar de 21,4°C, a grande maioria das estruturas, em especial em região seca, não verifica a segurança, quer pela metodologia Sul-africana (categoria A), quer pela metodologia usualmente adotada em Portugal. Algumas das estruturas são satisfatórias segundo a metodologia Sul-africana (categoria D), o que indica que as estruturas do catálogo apresentam, de acordo com a metodologia Sul-africana, um nível de serviço não compatível com a importância de cada uma das estradas, estabelecida em função da classe de tráfego.

Para condições similares de deformabilidade do solo de fundação e para valores de tráfego entre 6,0x10⁶ e 30,0x10⁶, admitindo um nível de serviço muito alto com um nível de confiança de 95%, a metodologia Sul-africana é mais conservativa que a metodologia Portuguesa.

Importa ainda salientar que o catálogo SATCC deve ser adotado somente para definição da secção tipo de pavimento, sendo que as espessuras dos materiais devem ser posteriormente afinadas com recurso a uma metodologia empírico-mecanicista.

6 Considerações Finais

6.1 Conclusões

Apresenta-se neste estudo o método empírico-mecanicista usualmente utilizado em Portugal para dimensionamento de pavimentos rodoviários flexíveis e semi-rígidos novos, dando-se especial relevo à consideração do espectro de tráfego e ao cálculo dos módulos de deformabilidade das misturas betuminosas, incluindo a possibilidade de dimensionamento através da utilização dos valores de temperatura mensal.

Dos exemplos apresentados, pode concluir-se que sempre que possível, mesmo no dimensionamento de pavimentos flexíveis de base e sub-base granular, deve considerar-se o espectro de tráfego, pois o mesmo conduz a valores de dano mais elevados, nomeadamente para o critério de dimensionamento relativo à deformação permanente no solo de fundação. Em pavimentos semi-rígidos ou com camada de base ou sub-base com ligantes hidráulicos, a necessidade de se adotar o espectro de tráfego é ainda mais relevante, dada a sensibilidade das camadas com ligantes hidráulicos ao valor da tensão na base das mesmas. Nestes casos, o critério de equivalência entre eixos, usualmente adotado na definição do número de eixos padrão equivalente, pode conduzir a valores de dano significativamente diferentes dos obtidos numa análise com base no espectro de tráfego.

Relativamente à influência da consideração do valor mensal da temperatura do ar em vez do valor anual da temperatura do ar, verifica-se que, em pavimentos do tipo flexível com camadas com ligantes hidráulicos ou em pavimentos do tipo semi-rígido, considera-se relevante a consideração dos valores de temperatura mensal. Em pavimentos flexíveis com camada de base e sub-base granular esta consideração já não é tão relevante pois a temperatura equivalente ponderada do ar, calculada com base na metodologia Shell, foi definida de modo a ter em conta o efeito de variação mensal.

Por fim, verifica-se que as novas abordagens de cálculo do módulo de deformabilidade em misturas betuminosas são, para os exemplos realizados, mais conservadoras, sendo que se obtêm menores módulos de deformabilidade, que com as expressões usualmente adotadas baseadas na metodologia da Universidade de Nottingham. Relativamente aos valores de dano estrutural são da mesma ordem de grandeza. Deste modo, no futuro, a consideração de novas metodologias de cálculo do módulo de deformabilidade das misturas betuminosas não deverá conduzir a estruturas de pavimento significativamente diferentes das atualmente preconizadas.

Apresentou-se o dimensionamento de pavimentos rodoviários pelo método Sul-africano, dando-se especial relevância aos modelos empírico-mecanicistas adotados (SAMDM). Da análise realizada verifica-se que:

- O dimensionamento de pavimentos rodoviários é realizado em função de níveis distintos de serviço, que são definidos em função da importância da estrada (A a D). Em Portugal, para estradas do tipo A, B e C, adotam-se os mesmos os princípios e critérios;
- A caracterização do tráfego e do período de dimensionamento seguem princípios próximos do modelo usualmente adotado em Portugal. A geometria do eixo padrão equivalente é ligeiramente diferente da Portuguesa, nas normas Sul-africanas ainda se adota o eixo padrão de 80 kN, enquanto em Portugal atualmente adota-se o eixo padrão de 130 kN;
- Os materiais a adotar em camada de base e sub-base granular são mais diversificados, admitindo-se materiais com origem natural. Em Portugal geralmente adotam-se nestas camadas materiais do tipo ABGE, que corresponde ao material do tipo G1 nas normas Sul-africanas;
- Os critérios de dimensionamento são mais alargados do que os adotados em Portugal, incluindo o controlo da deformação permanente em camadas granulares e o controlo do início de esmagamento e esmagamento avançado em camadas estabilizadas com cimento;
- Os critérios de dimensionamento relativos à fadiga em misturas betuminosas são menos conservativos para a metodologia adotada em Portugal, sendo que admitem um maior número de ciclos admissíveis para um dado valor de cálculo. Relativamente à previsão dos valores de deformabilidade em misturas betuminosas não são indicadas expressões para a sua determinação, apenas é definida uma gama de valores de referência em função da temperatura de serviço em misturas betuminosas;
- Os critérios de dimensionamento relativos à deformação permanente em solos de fundação são menos conservativos na metodologia Sul-africana, para valores de extensão vertical no topo da camada inferiores a $\approx 600 \times 10^{-6}$, para um valor de deformação permanente limite de 10 mm e inferiores a $\approx 1600 \times 10^{-6}$, para um valor de deformação permanente limite de 20 mm;
- O critério de dimensionamento relativo à fadiga em camadas estabilizadas com cimento é definido em termos de valores de extensão horizontal na base da camada, ao contrário da metodologia adotada em Portugal que considera um critério em função do nível de tensão horizontal na base da camada. Só para valores de rácio de extensão de cálculo sobre extensão última inferiores a $\approx 1,0$ é que o critério de fadiga Sul-africano é mais conservativo que a metodologia adotada em Portugal, obtendo-se maiores valores de dano.

Do exposto anteriormente verifica-se que, em especial para a categoria A e caso se adotem valores de deformabilidade do solo de fundação semelhantes, a aplicação da metodologia empírico-mecanicista Sul-africana conduz a estruturas de pavimento com maiores espessuras, relativamente à metodologia usualmente adotada em Portugal. Caso se adotem as condições de fundação mais conservativas na metodologia Portuguesa, as diferenças entre as duas metodologias atenuam-se.

As estruturas de catálogo definidas no SATCC para região seca são muito menos conservativas que as estruturas definidas para região húmida, pelo que, em região seca as estruturas de catálogo exigem um excelente desempenho dos materiais de pavimentação, nomeadamente dos materiais granulares, e do solo de fundação.

Para as estruturas de catálogo analisadas verifica-se que, quando se consideram propriedades das misturas betuminosas em função da temperatura ponderada anual do ar de 21,4°C, a grande maioria das estruturas, em especial em região seca, não verificam os critérios de dimensionamento, quer pela metodologia Sul-africana, quer pela metodologia usualmente adotada em Portugal.

Para o mesmo valor de módulo de deformabilidade do solo de fundação e para valores de tráfego entre $6,0 \times 10^6$ e $30,0 \times 10^6$, a metodologia Sul-africana para um nível de serviço muito alto, com um nível de confiança de 95%, é mais conservativa que a metodologia Portuguesa.

Face ao exposto, conclui-se que o método SATCC deve ser adotado somente para definição da tipologia de pavimento, devendo as espessuras dos materiais ser afinadas posteriormente com base numa metodologia empírico-mecanicista. Com efeito, um dimensionamento por catálogo não tem em consideração a grande variabilidade climática que existe ao longo da região correspondente à SADC, em especial das condições de temperatura, e a variabilidade dos materiais de pavimentação. Acresce ainda que as tipologias são definidas para gamas muito alargadas de condições de tráfego e de deformabilidade do solo de fundação.

6.2 Desenvolvimentos Futuros

Como desenvolvimentos futuros propõem-se os seguintes estudos:

- Definição de espectro de tráfego modelizado de eixos em função das classes de tráfego preconizadas no manual JAE (1995). Um ponto de partida poderão ser os espectros de tráfego modelizados por eixos, em função da carga típica por eixo, da carga limite legal e da carga máxima de veículos pesados a circular em Portugal (21 eixos) que deverão ser adaptados em função da classe de tráfego. O estudo deverá incluir a caracterização da tipologia do eixo e a configuração dos rodados em planta em função da categoria dos veículos pesados. Este estudo terá especial relevância para pavimentos semi-rígidos e flexíveis com camadas estabilizadas com cimento;
- Implementação na metodologia Portuguesa do critério de dimensionamento de deformação permanente em camada granular, tendo por base a equação proposta no método Sul-africano e ensaios experimentais triaxiais cíclicos a realizar sobre material do tipo ABGE ou disponíveis na literatura;
- Realização de ensaios experimentais de fadiga sobre materiais granulares estabilizados com cimento, que permitam aferir se o critério de dimensionamento proposto na metodologia Sul-africana é mais adequado ao comportamento real do material face ao critério de dimensionamento usualmente adotado na metodologia Portuguesa;

- Reformulação do catálogo SATCC (CSIR, 1998) com base na metodologia Sul-africana para três valores distintos de temperaturas de serviço (ex: 16°C, 20°C e 24°C), admitindo um solo de fundação com as características resistentes mínimas ($\text{CBR} \geq 15\%$) e apresentando as várias camadas em misturas betuminosas constituintes do pavimento de acordo com as espessuras usualmente adotadas, para três classes de betume (35/50, 60/70 e 80/100) e adotando uma gama de classes de tráfego menos alargada que a especificada no catálogo SATCC.

Bibliografia

AASHTO (1993). Guide for design of pavement structure. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO): Washington D.C.

AASHTO (2008). Mechanistic-empirical pavement design guide. A manual of practice. Washington, DC.

Afonso, J., Gomes, L. (2013). Dimensionamento de pavimentos rodoviários em África, 7º Congresso Nacional Rodoviário Português, Lisboa.

Alves, N., Teixeira, H., Varejão, M., Lopes, J. (2016). Dimensionamento de pavimentos aeroportuários com base nas novas normas de dimensionamento da FAA: Análise comparativa com a metodologia do avião crítico, 8º Congresso Rodoviário Português, Lisboa.

Antunes, M.L. (1993). Avaliação da capacidade de carga de pavimentos utilizando ensaios dinâmicos - Tese de Doutoramento, UTL, Lisboa.

Antunes, M.L. (2005). Modelação do comportamento de pavimentos rodoviários flexíveis – Programa de Investigação e Programa de Pós-graduação. LNEC. Lisboa.

Azevedo, M. (1993). Características mecânicas de misturas betuminosas para camadas de base de pavimentos - Tese de Doutoramento, UTL, Lisboa.

Bari, J., Witczak, M.W. (2006). Development of a new revised version of the Witczak E predictive model for asphalt mixtures, Asphalt Paving Technology: Association of Asphalt Paving Technologists-Proceedings of the Technical Sessions, pp 381-423.

Branco, F., Pereira, P., Santos, L. (2008), Pavimentos rodoviários, Almedina, Coimbra.

Brás, M. (2012). Validação estrutural dos pavimentos flexíveis indicados no “Manual de Conceção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional” – Dissertação de Mestrado, FEUP, Porto.

Brown, S., Brunton, J., Stock, A. (1985). The analytical design of bituminous pavements, Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Part 2, Vol 79, pp 1-31, London.

CSIR (1998). Code of practice for the design of road pavements, South African Transportation and Communication Commission (SATCC), Prepared by the division of Roads and Transport Technology (CSIR), Pretoria, South Africa.

Claessen, A.I.M., Edwards, J. E., Summer, P., Hughes, P. (1977). Asphalt pavement design. The Shell method. Fourth International Conference on Strutural Design of Asphalt Pavements, University of Michigan, Ann Arbor.

Chomicz-Kowalska, A. (2015). Statistics methods for evaluating associations between selected foamed bitumen parameters. 6th International conference Bituminous mixtures & Pavements VI. Editor Nikolaides.

De Jong, D., Peutz, M., Korswagen, A. (1979). Bisar: Layered systems under normal and tangencial loads, Koninklijke/Shell-Laboratorium, Amsterdam, Netherlands.

Dos Santos, S. (2015). Dimensionamento de pavimentos em África e na América Latina: Análise de manuais de pré-dimensionamento – Dissertação de Mestrado, FEUP, Porto.

EP (2014). Cadernos de encargos tipo de obra. Vol. 14.03 - Pavimentação. Características dos materiais. Estradas de Portugal (EP), SA.

FAA (2009). Federal Aviation Administration, Advisory circular 150/5320-6E. Airport Pavement Design and Evaluation, USA.

Freeme, C R. (1983). Evaluation of pavement behaviour for major rehabilitation of roads. Technical Report RP/19/83, National Institute for Transport and Road Research, CSIR, South Africa.

Hayhoe, G. F., (2002). LEAF – A new layered elastic computational program for FAA pavement design and evaluation procedures. Proceedings 2002 Federal Aviation Administration Technology Transfer Conference. Vol, 1, pp.75-95.

INAMET (2016). Normais climatológicas em Luanda, <http://www.inamet.gov.ao>.

INIR (2012). Diretivas para a conceção de pavimentos - Critérios de Dimensionamento, Instituto de Infraestruturas Rodoviárias (INIR) – Infraestruturas de Portugal (IP), Lisboa.

IPMA (2010). Normais climatológicas 1981-2010, <http://www.ipma.pt>.

JAE (1995). Manual de conceção de pavimentos para a rede rodoviária nacional, Junta Autónoma de Estradas (JAE), Almada.

Jordaan, G J. (1992). Towards improved procedures for the mechanistic analysis of cement-treated layers in pavements. Proceedings of the 7th International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Nottingham, England.

Kennedy, C. (1985). Analytical flexible pavement design: a critical state of the art review. Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Part 1, Vol 78, pp 897-917, London.

LCPC/SETRA (1994). Conception et dimensionnement des structures de chaussée. Guide Technique. Paris.

Lima, H., Quaresma, L., Fonseca, E. (1999). Caracterização do fator de agressividade do tráfego de veículos pesados em Portugal. JAE e LNEC. Proc. 092/16/12991. Lisboa.

Maina, J., Matsui, K. (2005). Elastic multi-layered analysis using DE-integration, Publ. Rims., 41, 853-867.

MnPave (2008). Flexible pavement design: mechanistic-empirical method, Minnesota Department of Transportation.

Monteiro Azevedo, N., Marecos, V. (2010). Análise comparativa de modelos utilizados na avaliação estrutural de pavimentos sujeitos a cargas verticais, pp 10, 12º Congresso Nacional de Geotecnia, Sociedade Portuguesa de Geotecnia, Guimarães.

NCHRP (2004). 202 Design guide: design of new and rehabilitated pavement structures. 1-37A Project. National Cooperative Highway Research Program.

Powell, W.D., Potter, J.F., Mayhew, H., Nunn, M. (1984). The structural design of bituminous roads, Transport and Research Laboratory, TRRL LR 1132, Crowthorne – Berkshire.

Sagliki, A., Gungori, A. (2012). Resilient modulus of unbound and bituminous road materials. 5th Euroasphalt and Eurobitumine. Editor Nikolaides.

SANRAL (2013). South African pavement engineering manual (SAPEM), Chapter 9 : Materials Utilisation and Design. Prepared by the South African National Roads Agency SOC Ltd (SANRAL). Pretoria. South Africa.

SANRAL (2014). South African pavement engineering manual (SAPEM), Chapter 10 : Pavement Design. Prepared by the South African National Roads Agency SOC Ltd (SANRAL). Pretoria. South Africa.

Shell (1978). Shell International Petroleum Company, I., Shell pavement design manual: asphalt pavements and overlays for road traffic. Shell International Petroleum, London.

Simões, F., Lopes, F., Ferreira, A., Micaelo, R., (2013) Aplicação a Portugal do novo método de dimensionamento de pavimentos rodoviários da AASHTO, 7º Congresso Rodoviário Português. Lisboa.

Sousa-Melo, A., Miranda, C.M., Ribeiro, J.Q. (1993). Conceção/dimensionamento de pavimentos rodoviários. Instituto da Construção, Porto.

Theyse, H.L., De Beer, M., Rust, F.C. (1996). Overview of the south african mechanistic pavement design analysis method, Division of Roads and Transport Technology, CSIR, South Africa.

Theyse, H.L., Muthen, M. (2000). Pavement analysis and design software (PADS) based on the south african mechanistic-empirical design method. South African Transport Conference 17 - 20 July 2000 "Action in transport for the new millennium", CSIR International Convention Centre, Pretoria.

TRH4 (1991). Structural design of flexible pavements for interurban and rural roads. DRAFT. Technical Recommendations for Highways. ISBN 1 86844 218 7. CSRA. Pretoria.

TRH16 (1991). Traffic loading for pavement and rehabilitation design. DRAFT. Technical Recommendations for Highways. ISBN 1 86844 46 1. CSRA. Pretoria.

Ullidtz, P., Peattie, K. (1980). Pavement analysis by programmable calculators. Vol. 103, Journal of transportation engineering, ASCE.

Witczak, M.W. (1972). Design of full-depth asphalt airfield pavements. 3rd International Conference on Strutural Design of Asphalt Pavements. London.

Anexos

Anexo I – Estruturas de pavimentos do catálogo do SATCC adotadas na verificação estrutural realizada

Catálogo D1 (camada de base e sub-base do tipo granular) – Classes de solos entre S2 e S5 – Classes de tráfego entre T6 e T8

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	5,0		2600	0,44
2	Camada granular em material britado (G2)	20,0		250	0,35
3	Camada granular em material natural (G6)	25,0		150	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR superior a 15 (G7)	25,0		120	0,35
5	Solo de fundação com índice CBR igual a 3.5	∞		35	0,35

a) Classe de tráfego T6

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	5,0		2600	0,44
2	Camada granular em material britado (G2)	20,0		250	0,35
3	Camada granular em material natural (G6)	25,0		150	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR superior a 15 (G7)	27,5		120	0,35
5	Solo de fundação com índice CBR igual a 3.5	∞		35	0,35

b) Classe de tráfego T7

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	5,0		2600	0,44
2	Camada granular em material britado (G2)	20,0		250	0,35
3	Camada granular em material natural (G6)	25,0		150	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR superior a 15 (G7)	30,0		120	0,35
5	Solo de fundação com índice CBR igual a 3.5	∞		35	0,35

c) Classe de tráfego T8

Figura I. 1 – Catálogo D1 do SATCC – Camada de base e sub-base granular - Classe de Solos S2 - Modelo de pavimento adotado na verificação estrutural realizada de acordo com o SAPEM

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	5,0		2600	0,44
2	Camada granular em material britado (G2)	20,0		400	0,35
3	Camada granular em material natural (G6)	25,0		210	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR superior a 15 (G7)	25,0		120	0,35
5	Solo de fundação com índice CBR igual a 3.5	∞		35	0,35

a) Classe de tráfego T6

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	5,0		2600	0,44
2	Camada granular em material britado (G2)	20,0		400	0,35
3	Camada granular em material natural (G6)	25,0		210	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR superior a 15 (G7)	27,5		120	0,35
5	Solo de fundação com índice CBR superior a 3.5	∞		35	0,35

b) Classe de tráfego T7

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	5,0		2600	0,44
2	Camada granular em material britado (G2)	20,0		400	0,35
3	Camada granular em material natural (G6)	25,0		210	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR superior a 15 (G7)	30,0		120	0,35
5	Solo de fundação com índice CBR igual a 3.5	∞		35	0,35

c) Classe de tráfego T8

Figura I. 2 – Catálogo D1 do SATCC – Camada de base e sub-base granular - Classe de Solos S2 - Modelo de pavimento adotado na verificação estrutural realizada de acordo com a metodologia Portuguesa

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	5,0		2600	0,44
2	Camada granular em material britado (G2)	20,0		250	0,35
3	Camada granular em material natural (G6)	20,0		150	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR superior a 15 (G7)	15,0		120	0,35
5	Solo de fundação com índice CBR igual a 6	∞		55	0,35

a) Classe de tráfego T6

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	5,0		2600	0,44
2	Camada granular em material britado (G2)	20,0		250	0,35
3	Camada granular em material natural (G6)	20,0		150	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR superior a 15 (G7)	17,5		120	0,35
5	Solo de fundação com índice CBR igual a 6	∞		55	0,35

b) Classe de tráfego T7

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	5,0		2600	0,44
2	Camada granular em material britado (G2)	20,0		250	0,35
3	Camada granular em material natural (G6)	20,0		150	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR superior a 15 (G7)	20,0		120	0,35
5	Solo de fundação com índice CBR igual a 6	∞		55	0,35

c) Classe de tráfego T8

Figura I. 3 – Catálogo D1 do SATCC – Camada de base e sub-base granular - Classe de Solos S3 - Modelo de pavimento adotado na verificação estrutural realizada de acordo com o SAPEM

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	5,0		2600	0,44
2	Camada granular em material britado (G2)	20,0		390	0,35
3	Camada granular em material natural (G6)	20,0		190	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR superior a 15 (G7)	15,0		120	0,35
5	Solo de fundação com índice CBR igual a 6	∞		55	0,35

a) Classe de tráfego T6

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	5,0		2600	0,44
2	Camada granular em material britado (G2)	20,0		390	0,35
3	Camada granular em material natural (G6)	20,0		190	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR superior a 15 (G7)	17,5		120	0,35
5	Solo de fundação com índice CBR igual a 6	∞		55	0,35

b) Classe de tráfego T7

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	5,0		2600	0,44
2	Camada granular em material britado (G2)	20,0		390	0,35
3	Camada granular em material natural (G6)	20,0		190	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR superior a 15 (G7)	20,0		120	0,35
5	Solo de fundação com índice CBR igual a 6	∞		55	0,35

c) Classe de tráfego T8

Figura I. 4 – Catálogo D1 do SATCC – Camada de base e sub-base granular - Classe de Solos S3 - Modelo de pavimento adotado na verificação estrutural realizada de acordo com a metodologia Portuguesa

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	5,0		2600	0,44
2	Camada granular em material britado (G2)	20,0		250	0,35
3	Camada granular em material natural (G6)	20,0		150	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR igual a 11	∞		80	0,35

a) Classe de tráfego T6

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	5,0		2600	0,44
2	Camada granular em material britado (G2)	20,0		250	0,35
3	Camada granular em material natural (G6)	22,5		150	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR igual a 11	∞		80	0,35

b) Classe de tráfego T7

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	5,0		2600	0,44
2	Camada granular em material britado (G2)	20,0		250	0,35
3	Camada granular em material natural (G6)	27,5		150	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR igual a 11	∞		80	0,35

c) Classe de tráfego T8

Figura I. 5 – Catálogo D1 do SATCC – Camada de base e sub-base granular - Classe de Solos S4 - Modelo de pavimento adotado na verificação estrutural realizada de acordo com o SAPEM

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	5,0		2600	0,44
2	Camada granular em material britado (G2)	20,0		260	0,35
3	Camada granular em material natural (G6)	20,0		130	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR igual a 11	∞		80	0,35

a) Classe de tráfego T6

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	5,0		2600	0,44
2	Camada granular em material britado (G2)	20,0		260	0,35
3	Camada granular em material natural (G6)	22,5		130	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR igual a 11	∞		80	0,35

b) Classe de tráfego T7

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	5,0		2600	0,44
2	Camada granular em material britado (G2)	20,0		300	0,35
3	Camada granular em material natural (G6)	27,5		150	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR igual a 11	∞		80	0,35

c) Classe de tráfego T8

Figura I. 6 – Catálogo D1 do SATCC – Camada de base e sub-base granular - Classe de Solos S4 - Modelo de pavimento adotado na verificação estrutural realizada de acordo com a metodologia Portuguesa

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Revestimento superficial simples (RSs)	2,0		600	0,44
2	Camada granular em material britado (G2)	15,0		250	0,35
3	Camada granular em material natural (G6)	10,0		150	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR igual a 22	∞		125	0,35

a) Classe de tráfego T6

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Revestimento superficial simples (RSs)	2,0		600	0,44
2	Camada granular em material britado (G2)	15,0		250	0,35
3	Camada granular em material natural (G6)	12,5		150	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR igual a 22	∞		125	0,35

b) Classe de tráfego T7

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Revestimento superficial simples (RSs)	2,0		600	0,44
2	Camada granular em material britado (G2)	15,0		250	0,35
3	Camada granular em material natural (G6)	12,5		150	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR igual a 22	∞		125	0,35

c) Classe de tráfego T8

Figura I. 7 – Catálogo D1 do SATCC – Camada de base e sub-base granular - Classe de Solos S5 - Modelo de pavimento adotado na verificação estrutural realizada de acordo com o SAPEM

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Revestimento superficial simples (RSs)	2,0		600	0,44
2	Camada granular em material britado (G2)	15,0		250	0,35
3	Camada granular em material natural (G6)	10,0		140	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR igual a 22	∞		125	0,35

a) Classe de tráfego T6

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Revestimento superficial simples (RSs)	2,0		600	0,44
2	Camada granular em material britado (G2)	15,0		280	0,35
3	Camada granular em material natural (G6)	12,5		160	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR igual a 22	∞		125	0,35

b) Classe de tráfego T7

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Revestimento superficial simples (RSs)	2,0		600	0,44
2	Camada granular em material britado (G2)	15,0		280	0,35
3	Camada granular em material natural (G6)	12,5		160	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR igual a 22	∞		125	0,35

c) Classe de tráfego T8

Figura I. 8 – Catálogo D1 do SATCC – Camada de base e sub-base granular - Classe de Solos S5 - Modelo de pavimento adotado na verificação estrutural realizada de acordo com a metodologia Portuguesa

Catálogo D4 (base em misturas betuminosas e sub-base do tipo granular) – Classes de solos entre S2 e S5 – Classes de tráfego entre T6 e T8

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de base	15,0		2800	0,44
2	Camada granular em material natural (G6)	20,0		150	0,35
3	Solo de fundação com índice CBR superior a 15 (G7)	20,0		120	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR igual a 3,5	∞		35	0,35

a) Classe de tráfego T6

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	5,0		2600	0,44
2	Mistura betuminosa contínua em camada de base	15,0		3100	0,44
3	Camada granular em material natural (G6)	20,0		150	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR superior a 15 (G7)	20,0		120	0,35
5	Solo de fundação com índice CBR igual a 3,5	∞		35	0,35

b) Classe de tráfego T7

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	5,0		2600	0,44
2	Mistura betuminosa contínua em camada de base	17,5		3200	0,44
3	Camada granular em material natural (G6)	20,0		150	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR superior a 15 (G7)	20,0		120	0,35
5	Solo de fundação com índice CBR igual a 3,5	∞		35	0,35

c) Classe de tráfego T8

Figura I. 9 – Catálogo D4 do SATCC – base em misturas betuminosas e sub-base granular - Classe de Solos S2 - Modelo de pavimento adotado na verificação estrutural realizada de acordo com o SAPEM

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de base	15,0		2800	0,44
2	Camada granular em material natural (G6)	20,0		190	0,35
3	Solo de fundação com índice CBR superior a 15 (G7)	20,0		120	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR igual a 3.5	∞		35	0,35

a) Classe de tráfego T6

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	5,0		2600	0,44
2	Mistura betuminosa contínua em camada de base	15,0		3100	0,44
3	Camada granular em material natural (G6)	20,0		190	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR superior a 15 (G7)	20,0		120	0,35
5	Solo de fundação com índice CBR igual a 3.5	∞		35	0,35

b) Classe de tráfego T7

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	5,0		2600	0,44
2	Mistura betuminosa contínua em camada de base	17,5		3200	0,44
3	Camada granular em material natural (G6)	20,0		190	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR superior a 15 (G7)	20,0		120	0,35
5	Solo de fundação com índice CBR superior a 3.5	∞		35	0,35

c) Classe de tráfego T8

Figura I. 10 – Catálogo D4 do SATCC – base em misturas betuminosas e sub-base granular - Classe de Solos S2 - Modelo de pavimento adotado na verificação estrutural realizada de acordo com a metodologia Portuguesa

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de base	12,5		2700	0,44
2	Camada granular em material natural (G6)	20,0		150	0,35
3	Solo de fundação com índice CBR superior a 15 (G7)	10,0		120	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR igual a 6	∞		55	0,35

a) Classe de tráfego T6

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	5,0		2600	0,44
2	Mistura betuminosa contínua em camada de base	12,5		3100	0,44
3	Camada granular em material natural (G6)	20,0		150	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR superior a 15 (G7)	10,0		120	0,35
5	Solo de fundação com índice CBR igual a 6	∞		55	0,35

b) Classe de tráfego T7

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	5,0		2600	0,44
2	Mistura betuminosa contínua em camada de base	15,0		3100	0,44
3	Camada granular em material natural (G6)	20,0		150	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR superior a 15 (G7)	10,0		120	0,35
5	Solo de fundação com índice CBR igual a 6	∞		55	0,35

c) Classe de tráfego T8

Figura I. 11 – Catálogo D4 do SATCC – base em misturas betuminosas e sub-base granular - Classe de Solos S3 - Modelo de pavimento adotado na verificação estrutural realizada de acordo com o SAPEM

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de base	12,5		2700	0,44
2	Camada granular em material natural (G6)	20,0		190	0,35
3	Solo de fundação com índice CBR superior a 15 (G7)	10,0		120	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR igual a 6	∞		55	0,35

a) Classe de tráfego T6

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	5,0		2600	0,44
2	Mistura betuminosa contínua em camada de base	12,5		3100	0,44
3	Camada granular em material natural (G6)	20,0		190	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR superior a 15 (G7)	10,0		120	0,35
5	Solo de fundação com índice CBR igual a 6	∞		55	0,35

b) Classe de tráfego T7

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	5,0		2600	0,44
2	Mistura betuminosa contínua em camada de base	15,0		3100	0,44
3	Camada granular em material natural (G6)	20,0		190	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR superior a 15 (G7)	10,0		120	0,35
5	Solo de fundação com índice CBR igual a 6	∞		55	0,35

c) Classe de tráfego T8

Figura I. 12 – Catálogo D4 do SATCC – base em misturas betuminosas e sub-base granular - Classe de Solos S3 - Modelo de pavimento adotado na verificação estrutural realizada de acordo com a metodologia Portuguesa

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de base	12,5		2700	0,44
2	Camada granular em material natural (G6)	20,0		150	0,35
3	Solo de fundação com índice CBR igual a 11	∞		80	0,35

a) Classe de tráfego T6

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	5,0		2600	0,44
2	Mistura betuminosa contínua em camada de base	12,5		3100	0,44
3	Camada granular em material natural (G6)	20,0		150	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR igual a 11	∞		80	0,35

b) Classe de tráfego T7

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	5,0		2600	0,44
2	Mistura betuminosa contínua em camada de base	15,0		3100	0,44
3	Camada granular em material natural (G6)	20,0		150	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR igual a 11	∞		80	0,35

c) Classe de tráfego T8

Figura I. 13 – Catálogo D4 do SATCC – base em misturas betuminosas e sub-base granular - Classe de Solos S4 - Modelo de pavimento adotado na verificação estrutural realizada de acordo com o SAPEM

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de base	12,5		2700	0,44
2	Camada granular em material natural (G6)	20,0		130	0,35
3	Solo de fundação com índice CBR igual a 11	∞		80	0,35

a) Classe de tráfego T6

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	5,0		2600	0,44
2	Mistura betuminosa contínua em camada de base	12,5		3100	0,44
3	Camada granular em material natural (G6)	20,0		130	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR igual a 11	∞		80	0,35

b) Classe de tráfego T7

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	5,0		2600	0,44
2	Mistura betuminosa contínua em camada de base	15,0		3100	0,44
3	Camada granular em material natural (G6)	20,0		130	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR igual a 11	∞		80	0,35

c) Classe de tráfego T8

Figura I. 14 – Catálogo D4 do SATCC – base em misturas betuminosas e sub-base granular - Classe de Solos S4 - Modelo de pavimento adotado na verificação estrutural realizada de acordo com a metodologia Portuguesa

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de base	10,0		2600	0,44
2	Camada granular em material natural (G6)	15,0		150	0,35
3	Solo de fundação com índice CBR igual a 22	∞		125	0,35

a) Classe de tráfego T6

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	5,0		2600	0,44
2	Mistura betuminosa contínua em camada de base	12,5		3100	0,44
3	Camada granular em material natural (G6)	15,0		150	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR igual a 22	∞		125	0,35

b) Classe de tráfego T7

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	5,0		2600	0,44
2	Mistura betuminosa contínua em camada de base	15,0		3100	0,44
3	Camada granular em material natural (G6)	15,0		150	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR igual a 22	∞		125	0,35

c) Classe de tráfego T8

Figura I. 15 – Catálogo D4 do SATCC – base em misturas betuminosas e sub-base granular - Classe de Solos S5 - Modelo de pavimento adotado na verificação estrutural realizada de acordo com o SAPEM

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de base	10,0		2600	0,44
2	Camada granular em material natural (G6)	15,0		170	0,35
3	Solo de fundação com índice CBR igual a 22	∞		125	0,35

a) Classe de tráfego T6

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	5,0		2600	0,44
2	Mistura betuminosa contínua em camada de base	12,5		3100	0,44
3	Camada granular em material natural (G6)	15,0		170	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR igual a 22	∞		125	0,35

b) Classe de tráfego T7

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	5,0		2600	0,44
2	Mistura betuminosa contínua em camada de base	15,0		3100	0,44
3	Camada granular em material natural (G6)	15,0		170	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR igual a 22	∞		125	0,35

c) Classe de tráfego T8

Figura I. 16 – Catálogo D4 do SATCC – base em misturas betuminosas e sub-base granular - Classe de Solos S5 - Modelo de pavimento adotado na verificação estrutural realizada de acordo com a metodologia Portuguesa

Catálogo D5 (base em misturas betuminosas e sub-base estabilizada com cimento) – Classes de solos entre S2 e S5 – Classes de tráfego entre T6 e T8

Camada	Designação	e (cm)	E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de base	9,0	2600	0,44
2	Camada granular estabilizada com cimento (C3)	30,0	2000	0,35
3	Solo de fundação com índice CBR superior a 15 (G7)	20,0	120	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR igual a 3.5	∞	35	0,35

a) Classe de tráfego T6

Camada	Designação	e (cm)	E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	4,0	2600	0,44
2	Mistura betuminosa contínua em camada de base	9,0	2900	0,44
3	Camada granular estabilizada com cimento (C3)	30,0	2000	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR superior a 15 (G7)	20,0	120	0,35
5	Solo de fundação com índice CBR igual a 3.5	∞	35	0,35

b) Classe de tráfego T7

Camada	Designação	e (cm)	E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	4,0	2600	0,44
2	Mistura betuminosa contínua em camada de base	12,0	3000	0,44
3	Camada granular estabilizada com cimento (C3)	30,0	2000	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR superior a 15 (G7)	20,0	120	0,35
5	Solo de fundação com índice CBR igual a 3.5	∞	35	0,35

c) Classe de tráfego T8

Figura I. 17 – Catálogo D5 do SATCC – base em misturas betuminosas e sub-base estabilizada com cimento - Classe de Solos S2 - Modelo de pavimento adotado na verificação estrutural realizada de acordo com o SAPEM

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de base	9,0		2600	0,44
2	Camada granular estabilizada com cimento (C3)	30,0		2000	0,35
3	Solo de fundação com índice CBR superior a 15 (G7)	20,0		120	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR igual a 3.5	∞		35	0,35

a) Classe de tráfego T6

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	4,0		2600	0,44
2	Mistura betuminosa contínua em camada de base	9,0		2900	0,44
3	Camada granular estabilizada com cimento (C3)	30,0		2000	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR superior a 15 (G7)	20,0		120	0,35
5	Solo de fundação com índice CBR igual a 3.5	∞		35	0,35

b) Classe de tráfego T7

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	4,0		2600	0,44
2	Mistura betuminosa contínua em camada de base	12,0		3000	0,44
3	Camada granular estabilizada com cimento (C3)	30,0		2000	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR superior a 15 (G7)	20,0		120	0,35
5	Solo de fundação com índice CBR igual a 3.5	∞		35	0,35

c) Classe de tráfego T8

Figura I. 18 – Catálogo D5 do SATCC – base em misturas betuminosas e sub-base estabilizada com cimento - Classe de Solos S2 - Modelo de pavimento adotado na verificação estrutural realizada de acordo com a metodologia Portuguesa

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de base	9,0		2600	0,44
2	Camada granular estabilizada com cimento (C3)	30,0		2000	0,35
3	Solo de fundação com índice CBR igual a 6	∞		55	0,35

a) Classe de tráfego T6

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	4,0		2600	0,44
2	Mistura betuminosa contínua em camada de base	9,0		2900	0,44
3	Camada granular estabilizada com cimento (C3)	35,0		2000	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR igual a 6	∞		55	0,35

b) Classe de tráfego T7

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	4,0		2600	0,44
2	Mistura betuminosa contínua em camada de base	12,0		3000	0,44
3	Camada granular estabilizada com cimento (C3)	30,0		2000	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR superior a 15 (G7)	10,0		120	0,35
5	Solo de fundação com índice CBR igual a 6	∞		55	0,35

c) Classe de tráfego T8

Figura I. 19 – Catálogo D5 do SATCC – base em misturas betuminosas e sub-base estabilizada com cimento - Classe de Solos S3 - Modelo de pavimento adotado na verificação estrutural realizada de acordo com o SAPEM

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de base	9,0		2600	0,44
2	Camada granular estabilizada com cimento (C3)	30,0		2000	0,35
3	Solo de fundação com índice CBR igual a 6	∞		55	0,35

a) Classe de tráfego T6

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	4,0		2600	0,44
2	Mistura betuminosa contínua em camada de base	9,0		2900	0,44
3	Camada granular estabilizada com cimento (C3)	35,0		2000	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR igual a 6	∞		55	0,35

b) Classe de tráfego T7

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	4,0		2600	0,44
2	Mistura betuminosa contínua em camada de base	12,0		3000	0,44
3	Camada granular estabilizada com cimento (C3)	30,0		2000	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR superior a 15 (G7)	10,0		120	0,35
5	Solo de fundação com índice CBR igual a 6	∞		55	0,35

c) Classe de tráfego T8

Figura I. 20 – Catálogo D5 do SATCC – base em misturas betuminosas e sub-base estabilizada com cimento - Classe de Solos S3 - Modelo de pavimento adotado na verificação estrutural realizada de acordo com a metodologia Portuguesa

Camada	Designação	e (cm)	E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de base	9,0	2600	0,44
2	Camada granular estabilizada com cimento (C3)	25,0	2000	0,35
3	Solo de fundação com índice CBR igual a 11	∞	80	0,35

a) Classe de tráfego T6

Camada	Designação	e (cm)	E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	4,0	2600	0,44
2	Mistura betuminosa contínua em camada de base	9,0	2900	0,44
3	Camada granular estabilizada com cimento (C3)	25,0	2000	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR igual a 11	∞	80	0,35

b) Classe de tráfego T7

Camada	Designação	e (cm)	E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	4,0	2600	0,44
2	Mistura betuminosa contínua em camada de base	12,0	3000	0,44
3	Camada granular estabilizada com cimento (C3)	30,0	2000	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR igual a 11	∞	80	0,35

c) Classe de tráfego T8

Figura I. 21 – Catálogo D5 do SATCC – base em misturas betuminosas e sub-base estabilizada com cimento - Classe de Solos S4 - Modelo de pavimento adotado na verificação estrutural realizada de acordo com o SAPEM

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de base	9,0		2600	0,44
2	Camada granular estabilizada com cimento (C3)	25,0		2000	0,35
3	Solo de fundação com índice CBR igual a 11	∞		80	0,35

a) Classe de tráfego T6

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	4,0		2600	0,44
2	Mistura betuminosa contínua em camada de base	9,0		2900	0,44
3	Camada granular estabilizada com cimento (C3)	25,0		2000	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR igual a 11	∞		80	0,35

b) Classe de tráfego T7

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	4,0		2600	0,44
2	Mistura betuminosa contínua em camada de base	12,0		3000	0,44
3	Camada granular estabilizada com cimento (C3)	30,0		2000	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR igual a 11	∞		80	0,35

c) Classe de tráfego T8

Figura I. 22 – Catálogo D5 do SATCC – base em misturas betuminosas e sub-base estabilizada com cimento - Classe de Solos S4 - Modelo de pavimento adotado na verificação estrutural realizada de acordo com a metodologia Portuguesa

Camada	Designação	e (cm)	E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de base	5,0	2600	0,44
2	Camada granular estabilizada com cimento (C3)	20,0	2000	0,35
3	Solo de fundação com índice CBR igual a 22	∞	125	0,35

a) Classe de tráfego T6

Camada	Designação	e (cm)	E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	4,0	2600	0,44
2	Mistura betuminosa contínua em camada de base	5,0	2700	0,44
3	Camada granular estabilizada com cimento (C3)	20,0	2000	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR igual a 22	∞	125	0,35

b) Classe de tráfego T7

Camada	Designação	e (cm)	E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	4,0	2600	0,44
2	Mistura betuminosa contínua em camada de base	5,0	2700	0,44
3	Camada granular estabilizada com cimento (C3)	25,0	2000	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR igual a 22	∞	125	0,35

c) Classe de tráfego T8

Figura I. 23 – Catálogo D5 do SATCC – base em misturas betuminosas e sub-base estabilizada com cimento - Classe de Solos S5 - Modelo de pavimento adotado na verificação estrutural realizada de acordo com o SAPEM

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de base	5,0		2600	0,44
2	Camada granular estabilizada com cimento (C3)	20,0		2000	0,35
3	Solo de fundação com índice CBR igual a 22	∞		125	0,35

a) Classe de tráfego T6

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	4,0		2600	0,44
2	Mistura betuminosa contínua em camada de base	5,0		2700	0,44
3	Camada granular estabilizada com cimento (C3)	20,0		2000	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR igual a 22	∞		125	0,35

b) Classe de tráfego T7

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	4,0		2600	0,44
2	Mistura betuminosa contínua em camada de base	5,0		2700	0,44
3	Camada granular estabilizada com cimento (C3)	25,0		2000	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR igual a 22	∞		125	0,35

c) Classe de tráfego T8

Figura I. 24 – Catálogo D5 do SATCC – base em misturas betuminosas e sub-base estabilizada com cimento - Classe de Solos S5 - Modelo de pavimento adotado na verificação estrutural realizada de acordo com a metodologia Portuguesa

Catálogo W1 (camada de base e sub-base do tipo granular) – Classes de solos entre S2 e S5 – Classes de tráfego entre T6 e T8

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua	10,0		2600	0,44
2	Camada granular em material britado (G2)	20,0		250	0,35
3	Camada granular em material natural (G6)	22,5		150	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR superior a 15 (G7)	20,0		120	0,35
5	Solo de fundação com índice CBR igual a 3.5	∞		35	0,35

a) Classe de tráfego T6

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua	12,5		2700	0,44
2	Camada granular em material britado (G2)	20,0		250	0,35
3	Camada granular em material natural (G6)	25,0		150	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR superior a 15 (G7)	20,0		120	0,35
5	Solo de fundação com índice CBR igual a 3.5	∞		35	0,35

b) Classe de tráfego T7

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	15,0		2800	0,44
2	Camada granular em material britado (G2)	20,0		250	0,35
3	Camada granular em material natural (G6)	30,0		150	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR superior a 15 (G7)	20,0		120	0,35
5	Solo de fundação com índice CBR igual a 3.5	∞		35	0,35

c) Classe de tráfego T8

Figura I. 25 – Catálogo W1 do SATCC – Camada de base e sub-base granular - Classe de Solos S2 - Modelo de pavimento adotado na verificação estrutural realizada de acordo com o SAPEM

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua	10,0		2600	0,44
2	Camada granular em material britado (G2)	20,0		400	0,35
3	Camada granular em material natural (G6)	22,5		200	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR superior a 15 (G7)	20,0		120	0,35
5	Solo de fundação com índice CBR igual a 3.5	∞		35	0,35

a) Classe de tráfego T6

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua	12,5		2700	0,44
2	Camada granular em material britado (G2)	20,0		400	0,35
3	Camada granular em material natural (G6)	25,0		210	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR superior a 15 (G7)	20,0		120	0,35
5	Solo de fundação com índice CBR igual a 3.5	∞		35	0,35

b) Classe de tráfego T7

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	15,0		2800	0,44
2	Camada granular em material britado (G2)	20,0		400	0,35
3	Camada granular em material natural (G6)	30,0		230	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR superior a 15 (G7)	20,0		120	0,35
5	Solo de fundação com índice CBR igual a 3.5	∞		35	0,35

c) Classe de tráfego T8

Figura I. 26 – Catálogo W1 do SATCC – Camada de base e sub-base granular - Classe de Solos S2 - Modelo de pavimento adotado na verificação estrutural realizada de acordo com a metodologia Portuguesa

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua	10,0		2600	0,44
2	Camada granular em material britado (G2)	20,0		250	0,35
3	Camada granular em material natural (G6)	25,0		150	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR igual a 6	∞		55	0,35

a) Classe de tráfego T6

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua	12,5		2700	0,44
2	Camada granular em material britado (G2)	20,0		250	0,35
3	Camada granular em material natural (G6)	27,5		150	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR igual a 6	∞		55	0,35

b) Classe de tráfego T7

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua	15,0		2800	0,44
2	Camada granular em material britado (G2)	20,0		250	0,35
3	Camada granular em material natural (G6)	32,5		150	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR igual a 6	∞		55	0,35

c) Classe de tráfego T8

Figura I. 27 – Catálogo W1 do SATCC – Camada de base e sub-base granular - Classe de Solos S3 - Modelo de pavimento adotado na verificação estrutural realizada de acordo com o SAPEM

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua	10,0		2600	0,44
2	Camada granular em material britado (G2)	20,0		180	0,35
3	Camada granular em material natural (G6)	25,0		90	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR igual a 6	∞		55	0,35

a) Classe de tráfego T6

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua	12,5		2700	0,44
2	Camada granular em material britado (G2)	20,0		200	0,35
3	Camada granular em material natural (G6)	27,5		100	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR igual a 6	∞		55	0,35

b) Classe de tráfego T7

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua	15,0		2800	0,44
2	Camada granular em material britado (G2)	20,0		220	0,35
3	Camada granular em material natural (G6)	32,5		110	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR igual a 6	∞		55	0,35

c) Classe de tráfego T8

Figura I. 28 – Catálogo W1 do SATCC – Camada de base e sub-base granular - Classe de Solos S3 - Modelo de pavimento adotado na verificação estrutural realizada de acordo com a metodologia Portuguesa

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua	10,0		2600	0,44
2	Camada granular em material britado (G2)	20,0		250	0,35
3	Camada granular em material natural (G6)	17,5		150	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR igual a 11	∞		80	0,35

a) Classe de tráfego T6

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua	12,5		2700	0,44
2	Camada granular em material britado (G2)	20,0		250	0,35
3	Camada granular em material natural (G6)	20,0		150	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR igual a 11	∞		80	0,35

b) Classe de tráfego T7

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua	15,0		2800	0,44
2	Camada granular em material britado (G2)	20,0		250	0,35
3	Camada granular em material natural (G6)	22,5		150	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR igual a 11	∞		80	0,35

c) Classe de tráfego T8

Figura I. 29 – Catálogo W1 do SATCC – Camada de base e sub-base granular - Classe de Solos S4 - Modelo de pavimento adotado na verificação estrutural realizada de acordo com o SAPEM

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua	10,0		2600	0,44
2	Camada granular em material britado (G2)	20,0		240	0,35
3	Camada granular em material natural (G6)	17,5		120	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR igual a 11	∞		80	0,35

a) Classe de tráfego T6

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua	12,5		2700	0,44
2	Camada granular em material britado (G2)	20,0		260	0,35
3	Camada granular em material natural (G6)	20,0		130	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR igual a 11	∞		80	0,35

b) Classe de tráfego T7

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua	15,0		2800	0,44
2	Camada granular em material britado (G2)	20,0		260	0,35
3	Camada granular em material natural (G6)	22,5		130	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR igual a 11	∞		80	0,35

c) Classe de tráfego T8

Figura I. 30 – Catálogo W1 do SATCC – Camada de base e sub-base granular - Classe de Solos S4 - Modelo de pavimento adotado na verificação estrutural realizada de acordo com a metodologia Portuguesa

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa continuave	10,0		2600	0,44
2	Camada granular em material britado (G2)	15,0		250	0,35
3	Camada granular em material natural (G6)	15,0		150	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR igual a 22	∞		125	0,35

a) Classe de tráfego T6

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua	12,5		2700	0,44
2	Camada granular em material britado (G2)	17,5		250	0,35
3	Camada granular em material natural (G6)	15,0		150	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR igual a 22	∞		125	0,35

b) Classe de tráfego T7

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua	15,0		2800	0,44
2	Camada granular em material britado (G2)	20,0		250	0,35
3	Camada granular em material natural (G6)	15,0		150	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR igual a 22	∞		125	0,35

c) Classe de tráfego T8

Figura I. 31 – Catálogo W1 do SATCC – Camada de base e sub-base granular - Classe de Solos S5 - Modelo de pavimento adotado na verificação estrutural realizada de acordo com o SAPEM

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa continuave	10,0		2600	0,44
2	Camada granular em material britado (G2)	15,0		300	0,35
3	Camada granular em material natural (G6)	15,0		170	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR igual a 22	∞		125	0,35

a) Classe de tráfego T6

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua	12,5		2700	0,44
2	Camada granular em material britado (G2)	17,5		330	0,35
3	Camada granular em material natural (G6)	15,0		170	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR igual a 22	∞		125	0,35

b) Classe de tráfego T7

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua	15,0		2800	0,44
2	Camada granular em material britado (G2)	20,0		350	0,35
3	Camada granular em material natural (G6)	15,0		170	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR igual a 22	∞		125	0,35

c) Classe de tráfego T8

Figura I. 32 – Catálogo W1 do SATCC – Camada de base e sub-base granular - Classe de Solos S5 - Modelo de pavimento adotado na verificação estrutural realizada de acordo com a metodologia Portuguesa

Catálogo W4 (base em misturas betuminosas e sub-base do tipo granular) – Classes de solos entre S2 e S5 – Classes de tráfego entre T6 e T8

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	5,0		2600	0,44
2	Mistura betuminosa contínua em camada de base	15,0		3100	0,44
3	Camada granular em material natural (G6)	20,0		150	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR superior a 15 (G7)	22,5		120	0,35
5	Solo de fundação com índice CBR igual a 3.5	∞		35	0,35

a) Classe de tráfego T6

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	5,0		2600	0,44
2	Mistura betuminosa contínua em camada de base	17,5		3200	0,44
3	Camada granular em material natural (G6)	20,0		150	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR superior a 15 (G7)	22,5		120	0,35
5	Solo de fundação com índice CBR igual a 3.5	∞		35	0,35

b) Classe de tráfego T7

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	5,0		2600	0,44
2	Mistura betuminosa contínua em camada de base	20,0		3200	0,44
3	Camada granular em material natural (G6)	20,0		150	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR superior a 15 (G7)	25,0		120	0,35
5	Solo de fundação com índice CBR igual a 3.5	∞		35	0,35

c) Classe de tráfego T8

Figura I. 33 – Catálogo W4 do SATCC – base em misturas betuminosas e sub-base granular - Classe de Solos S2 - Modelo de pavimento adotado na verificação estrutural realizada de acordo com o SAPEM

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	5,0		2600	0,44
2	Mistura betuminosa contínua em camada de base	15,0		3100	0,44
3	Camada granular em material natural (G6)	20,0		190	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR superior a 15 (G7)	22,5		120	0,35
5	Solo de fundação com índice CBR igual a 3.5	∞		35	0,35

a) Classe de tráfego T6

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	5,0		2600	0,44
2	Mistura betuminosa contínua em camada de base	17,5		3200	0,44
3	Camada granular em material natural (G6)	20,0		190	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR superior a 15 (G7)	22,5		120	0,35
5	Solo de fundação com índice CBR igual a 3.5	∞		35	0,35

b) Classe de tráfego T7

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	5,0		2600	0,44
2	Mistura betuminosa contínua em camada de base	20,0		3200	0,44
3	Camada granular em material natural (G6)	20,0		190	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR superior a 15 (G7)	25,0		120	0,35
5	Solo de fundação com índice CBR igual a 3.5	∞		35	0,35

c) Classe de tráfego T8

Figura I. 34 – Catálogo W4 do SATCC – base em misturas betuminosas e sub-base granular - Classe de Solos S2 - Modelo de pavimento adotado na verificação estrutural realizada de acordo com a metodologia Portuguesa

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	5,0		2600	0,44
2	Mistura betuminosa contínua em camada de base	15,0		3100	0,44
3	Camada granular em material natural (G6)	20,0		150	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR superior a 15 (G7)	10,0		120	0,35
5	Solo de fundação com índice CBR igual a 6	∞		55	0,35

a) Classe de tráfego T6

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	5,0		2600	0,44
2	Mistura betuminosa contínua em camada de base	17,5		3200	0,44
3	Camada granular em material natural (G6)	20,0		150	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR superior a 15 (G7)	10,0		120	0,35
5	Solo de fundação com índice CBR igual a 6	∞		55	0,35

b) Classe de tráfego T7

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	5,0		2600	0,44
2	Mistura betuminosa contínua em camada de base	20,0		3200	0,44
3	Camada granular em material natural (G6)	20,0		150	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR superior a 15 (G7)	10,0		120	0,35
5	Solo de fundação com índice CBR igual a 6	∞		55	0,35

c) Classe de tráfego T8

Figura I. 35 – Catálogo W4 do SATCC – base em misturas betuminosas e sub-base granular - Classe de Solos S3 - Modelo de pavimento adotado na verificação estrutural realizada de acordo com o SAPEM

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	5,0		2600	0,44
2	Mistura betuminosa contínua em camada de base	15,0		3100	0,44
3	Camada granular em material natural (G6)	20,0		190	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR superior a 15 (G7)	10,0		120	0,35
5	Solo de fundação com índice CBR igual a 6	∞		55	0,35

a) Classe de tráfego T6

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	5,0		2600	0,44
2	Mistura betuminosa contínua em camada de base	17,5		3200	0,44
3	Camada granular em material natural (G6)	20,0		190	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR superior a 15 (G7)	10,0		120	0,35
5	Solo de fundação com índice CBR igual a 6	∞		55	0,35

b) Classe de tráfego T7

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	5,0		2600	0,44
2	Mistura betuminosa contínua em camada de base	20,0		3200	0,44
3	Camada granular em material natural (G6)	20,0		190	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR superior a 15 (G7)	10,0		120	0,35
5	Solo de fundação com índice CBR igual a 6	∞		55	0,35

c) Classe de tráfego T8

Figura I. 36 – Catálogo W4 do SATCC – base em misturas betuminosas e sub-base granular - Classe de Solos S3 - Modelo de pavimento adotado na verificação estrutural realizada de acordo com a metodologia Portuguesa

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	5,0		2600	0,44
2	Mistura betuminosa contínua em camada de base	15,0		3100	0,44
3	Camada granular em material natural (G6)	20,0		150	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR igual a 11	∞		80	0,35

a) Classe de tráfego T6

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	5,0		2600	0,44
2	Mistura betuminosa contínua em camada de base	17,5		3200	0,44
3	Camada granular em material natural (G6)	20,0		150	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR igual a 11	∞		80	0,35

b) Classe de tráfego T7

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	5,0		2600	0,44
2	Mistura betuminosa contínua em camada de base	20,0		3200	0,44
3	Camada granular em material natural (G6)	20,0		150	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR igual a 11	∞		80	0,35

c) Classe de tráfego T8

Figura I. 37 – Catálogo W4 do SATCC – base em misturas betuminosas e sub-base granular - Classe de Solos S4 - Modelo de pavimento adotado na verificação estrutural realizada de acordo com o SAPEM

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	5,0		2600	0,44
2	Mistura betuminosa contínua em camada de base	15,0		3100	0,44
3	Camada granular em material natural (G6)	20,0		90	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR superior a 11	∞		80	0,35

a) Classe de tráfego T6

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	5,0		2600	0,44
2	Mistura betuminosa contínua em camada de base	17,5		3200	0,44
3	Camada granular em material natural (G6)	20,0		130	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR igual a 11	∞		80	0,35

b) Classe de tráfego T7

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	5,0		2600	0,44
2	Mistura betuminosa contínua em camada de base	20,0		3200	0,44
3	Camada granular em material natural (G6)	20,0		130	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR igual a 11	∞		80	0,35

c) Classe de tráfego T8

Figura I. 38 – Catálogo W4 do SATCC – base em misturas betuminosas e sub-base granular - Classe de Solos S4 - Modelo de pavimento adotado na verificação estrutural realizada de acordo com a metodologia Portuguesa

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	5,0		2600	0,44
2	Mistura betuminosa contínua em camada de base	10,0		3000	0,44
3	Camada granular em material natural (G6)	15,0		150	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR igual a 22	∞		125	0,35

a) Classe de tráfego T6

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	5,0		2600	0,44
2	Mistura betuminosa contínua em camada de base	12,5		3100	0,44
3	Camada granular em material natural (G6)	15,0		150	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR igual a 22	∞		125	0,35

b) Classe de tráfego T7

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	5,0		2600	0,44
2	Mistura betuminosa contínua em camada de base	15,0		3100	0,44
3	Camada granular em material natural (G6)	15,0		150	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR igual a 22	∞		125	0,35

c) Classe de tráfego T8

Figura I. 39 – Catálogo W4 do SATCC – base em misturas betuminosas e sub-base granular - Classe de Solos S5 - Modelo de pavimento adotado na verificação estrutural realizada de acordo com o SAPEM

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	5,0		2600	0,44
2	Mistura betuminosa contínua em camada de base	10,0		3000	0,44
3	Camada granular em material natural (G6)	15,0		170	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR igual a 22	∞		125	0,35

a) Classe de tráfego T6

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	5,0		2600	0,44
2	Mistura betuminosa contínua em camada de base	12,5		3100	0,44
3	Camada granular em material natural (G6)	15,0		170	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR igual a 22	∞		125	0,35

b) Classe de tráfego T7

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	5,0		2600	0,44
2	Mistura betuminosa contínua em camada de base	15,0		3100	0,44
3	Camada granular em material natural (G6)	15,0		170	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR igual a 22	∞		125	0,35

c) Classe de tráfego T8

Figura I. 40 – Catálogo W4 do SATCC – base em misturas betuminosas e sub-base granular - Classe de Solos S5 - Modelo de pavimento adotado na verificação estrutural realizada de acordo com a metodologia Portuguesa

Catálogo W5 (base em misturas betuminosas e sub-base estabilizada com cimento) – Classes de solos entre S2 e S5 – Classes de tráfego entre T6 e T8

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	4,0		2600	0,44
2	Mistura betuminosa contínua em camada de base	9,0		2900	0,44
3	Camada granular estabilizada com cimento (C3)	30,0		2000	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR superior a 15 (G7)	20,0		120	0,35
5	Solo de fundação com índice CBR igual a 3.5	∞		35	0,35

a) Classe de tráfego T6

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	4,0		2600	0,44
2	Mistura betuminosa contínua em camada de base	12,0		3000	0,44
3	Camada granular estabilizada com cimento (C3)	30,0		2000	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR superior a 15 (G7)	20,0		120	0,35
5	Solo de fundação com índice CBR igual a 3.5	∞		35	0,35

b) Classe de tráfego T7

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	4,0		2600	0,44
2	Mistura betuminosa contínua em camada de base	15,0		3100	0,44
3	Camada granular estabilizada com cimento (C3)	30,0		2000	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR superior a 15 (G7)	20,0		120	0,35
5	Solo de fundação com índice CBR igual a 3.5	∞		35	0,35

c) Classe de tráfego T8

Figura I. 41 – Catálogo W5 do SATCC – base em misturas betuminosas e sub-base estabilizada com cimento - Classe de Solos S2 - Modelo de pavimento adotado na verificação estrutural realizada de acordo com o SAPEM

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	4,0		2600	0,44
2	Mistura betuminosa contínua em camada de base	9,0		2900	0,44
3	Camada granular estabilizada com cimento (C3)	30,0		2000	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR superior a 15 (G7)	20,0		120	0,35
5	Solo de fundação com índice CBR igual a 3.5	∞		35	0,35

a) Classe de tráfego T6

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	4,0		2600	0,44
2	Mistura betuminosa contínua em camada de base	12,0		3000	0,44
3	Camada granular estabilizada com cimento (C3)	30,0		2000	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR superior a 15 (G7)	20,0		120	0,35
5	Solo de fundação com índice CBR igual a 3.5	∞		35	0,35

b) Classe de tráfego T7

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	4,0		2600	0,44
2	Mistura betuminosa contínua em camada de base	15,0		3100	0,44
3	Camada granular estabilizada com cimento (C3)	30,0		2000	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR superior a 15 (G7)	20,0		120	0,35
5	Solo de fundação com índice CBR igual a 3.5	∞		35	0,35

c) Classe de tráfego T8

Figura I. 42 – Catálogo W5 do SATCC – base em misturas betuminosas e sub-base estabilizada com cimento - Classe de Solos S2 - Modelo de pavimento adotado na verificação estrutural realizada de acordo com a metodologia Portuguesa

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	4,0		2600	0,44
2	Mistura betuminosa contínua em camada de base	12,0		3000	0,44
3	Camada granular estabilizada com cimento (C3)	30,0		2000	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR igual a 6	∞		55	0,35

a) Classe de tráfego T6

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	4,0		2600	0,44
2	Mistura betuminosa contínua em camada de base	12,0		3000	0,44
3	Camada granular estabilizada com cimento (C3)	35,0		2000	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR igual a 6	∞		55	0,35

b) Classe de tráfego T7

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	4,0		2600	0,44
2	Mistura betuminosa contínua em camada de base	12,0		3000	0,44
3	Camada granular estabilizada com cimento (C3)	40,0		2000	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR igual a 6	∞		55	0,35

c) Classe de tráfego T8

Figura I. 43 – Catálogo W5 do SATCC – base em misturas betuminosas e sub-base estabilizada com cimento - Classe de Solos S3 - Modelo de pavimento adotado na verificação estrutural realizada de acordo com o SAPEM

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	4,0		2600	0,44
2	Mistura betuminosa contínua em camada de base	12,0		3000	0,44
3	Camada granular estabilizada com cimento (C3)	30,0		2000	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR igual a 6	∞		55	0,35

a) Classe de tráfego T6

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	4,0		2600	0,44
2	Mistura betuminosa contínua em camada de base	12,0		3000	0,44
3	Camada granular estabilizada com cimento (C3)	35,0		2000	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR igual a 6	∞		55	0,35

b) Classe de tráfego T7

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	4,0		2600	0,44
2	Mistura betuminosa contínua em camada de base	12,0		3000	0,44
3	Camada granular estabilizada com cimento (C3)	40,0		2000	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR igual a 6	∞		55	0,35

c) Classe de tráfego T8

Figura I. 44 – Catálogo W5 do SATCC – base em misturas betuminosas e sub-base estabilizada com cimento - Classe de Solos S3 - Modelo de pavimento adotado na verificação estrutural realizada de acordo com a metodologia Portuguesa

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	4,0		2600	0,44
2	Mistura betuminosa contínua em camada de base	9,0		2900	0,44
3	Camada granular estabilizada com cimento (C3)	30,0		2000	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR igual a 11	∞		80	0,35

a) Classe de tráfego T6

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	4,0		2600	0,44
2	Mistura betuminosa contínua em camada de base	12,0		3000	0,44
3	Camada granular estabilizada com cimento (C3)	30,0		2000	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR igual a 11	∞		80	0,35

b) Classe de tráfego T7

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	4,0		2600	0,44
2	Mistura betuminosa contínua em camada de base	12,0		3000	0,44
3	Camada granular estabilizada com cimento (C3)	35,0		2000	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR igual a 11	∞		80	0,35

c) Classe de tráfego T8

Figura I. 45 – Catálogo W5 do SATCC – base em misturas betuminosas e sub-base estabilizada com cimento - Classe de Solos S4 - Modelo de pavimento adotado na verificação estrutural realizada de acordo com o SAPEM

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	4,0		2600	0,44
2	Mistura betuminosa contínua em camada de base	9,0		2900	0,44
3	Camada granular estabilizada com cimento (C3)	30,0		2000	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR igual a 11	∞		80	0,35

a) Classe de tráfego T6

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	4,0		2600	0,44
2	Mistura betuminosa contínua em camada de base	12,0		3000	0,44
3	Camada granular estabilizada com cimento (C3)	30,0		2000	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR igual a 11	∞		80	0,35

b) Classe de tráfego T7

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	4,0		2600	0,44
2	Mistura betuminosa contínua em camada de base	12,0		3000	0,44
3	Camada granular estabilizada com cimento (C3)	35,0		2000	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR igual a 11	∞		80	0,35

c) Classe de tráfego T8

Figura I. 46 – Catálogo W5 do SATCC – base em misturas betuminosas e sub-base estabilizada com cimento - Classe de Solos S4 - Modelo de pavimento adotado na verificação estrutural realizada de acordo com a metodologia Portuguesa

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	4,0		2600	0,44
2	Mistura betuminosa contínua em camada de base	5,0		2700	0,44
3	Camada granular estabilizada com cimento (C3)	20,0		2000	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR igual a 22	∞		125	0,35

a) Classe de tráfego T6

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	4,0		2600	0,44
2	Mistura betuminosa contínua em camada de base	9,0		2900	0,44
3	Camada granular estabilizada com cimento (C3)	20,0		2000	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR igual a 22	∞		125	0,35

b) Classe de tráfego T7

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	4,0		2600	0,44
2	Mistura betuminosa contínua em camada de base	9,0		2900	0,44
3	Camada granular estabilizada com cimento (C3)	25,0		2000	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR igual a 22	∞		125	0,35

c) Classe de tráfego T8

Figura I. 47 – Catálogo W5 do SATCC – base em misturas betuminosas e sub-base estabilizada com cimento - Classe de Solos S5 - Modelo de pavimento adotado na verificação estrutural realizada de acordo com o SAPEM

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	4,0		2600	0,44
2	Mistura betuminosa contínua em camada de base	5,0		2700	0,44
3	Camada granular estabilizada com cimento (C3)	20,0		2000	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR igual a 22	∞		125	0,35

a) Classe de tráfego T6

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	4,0		2600	0,44
2	Mistura betuminosa contínua em camada de base	9,0		2900	0,44
3	Camada granular estabilizada com cimento (C3)	20,0		2000	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR igual a 22	∞		125	0,35

b) Classe de tráfego T7

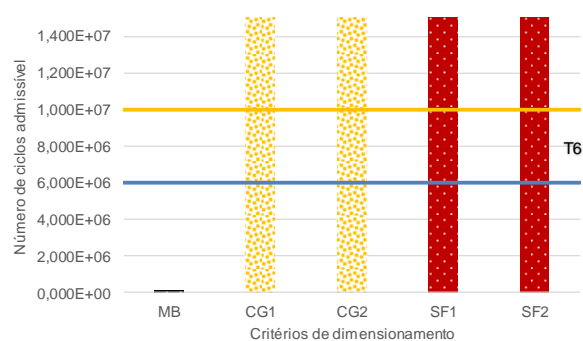
Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Mistura betuminosa contínua em camada de desgaste	4,0		2600	0,44
2	Mistura betuminosa contínua em camada de base	9,0		2900	0,44
3	Camada granular estabilizada com cimento (C3)	25,0		2000	0,35
4	Solo de fundação com índice CBR igual a 22	∞		125	0,35

c) Classe de tráfego T8

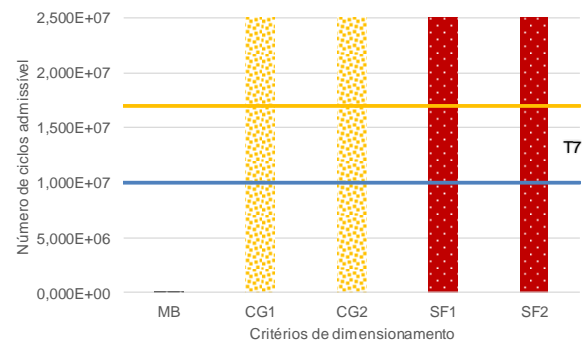
Figura I. 48 – Catálogo W5 do SATCC – base em misturas betuminosas e sub-base estabilizada com cimento - Classe de Solos S5 - Modelo de pavimento adotado na verificação estrutural realizada de acordo com a metodologia Portuguesa

Anexo II – Verificação estrutural das estruturas de pavimentos do catálogo do SATCC

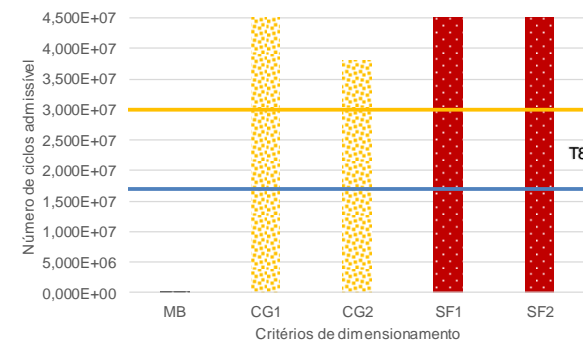
Catálogo D1 (camada de base e sub-base do tipo granular) – Classes de solos entre S2 e S5 – Classes de tráfego entre T6 e T8



a) Classe de tráfego T6

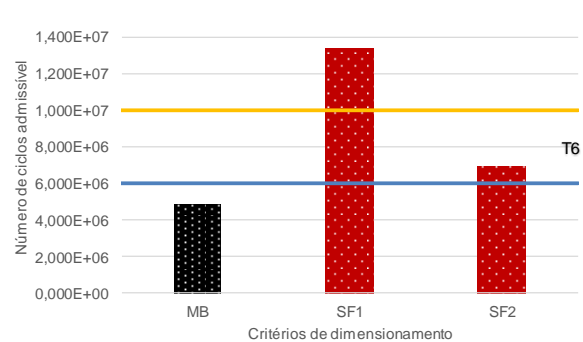


b) Classe de tráfego T7

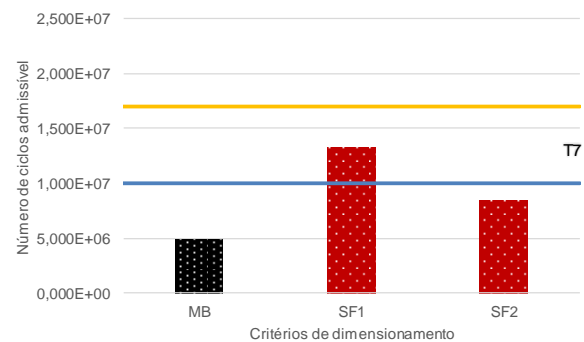


c) Classe de tráfego T8

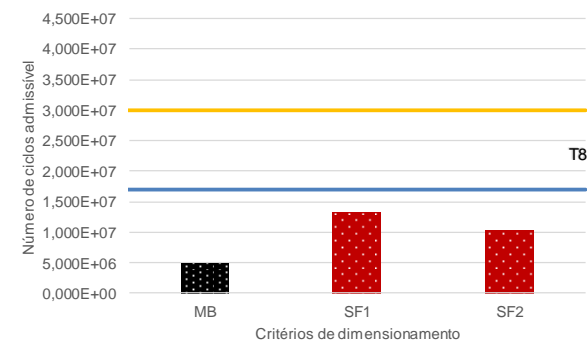
Figura II. 1 – Catálogo D1 do SATCC – Camada de base e sub-base granular - Classe de Solos S2 - Verificação estrutural realizada de acordo com o SAPEM (Categoria A)



a) Classe de tráfego T6

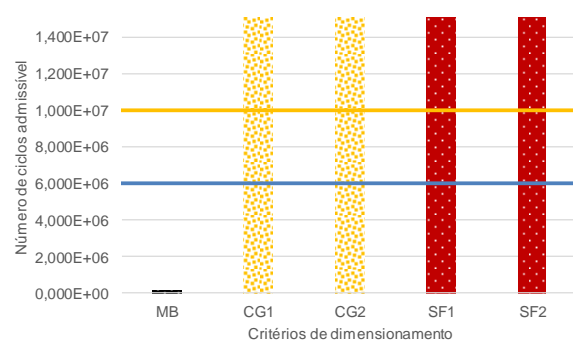


b) Classe de tráfego T7

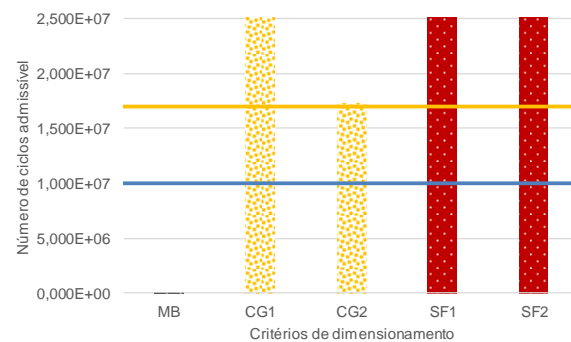


c) Classe de tráfego T8

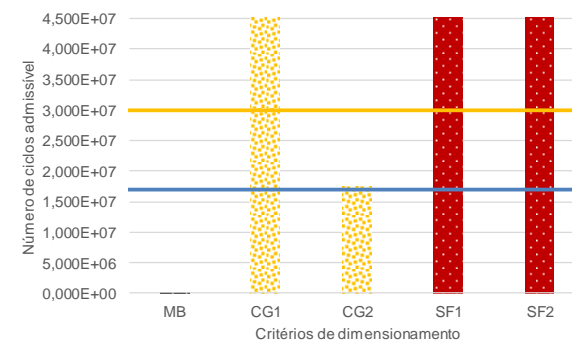
Figura II. 2 – Catálogo D1 do SATCC – Camada de base e sub-base granular - Classe de Solos S2 - Verificação estrutural realizada de acordo com a metodologia Portuguesa



a) Classe de tráfego T6

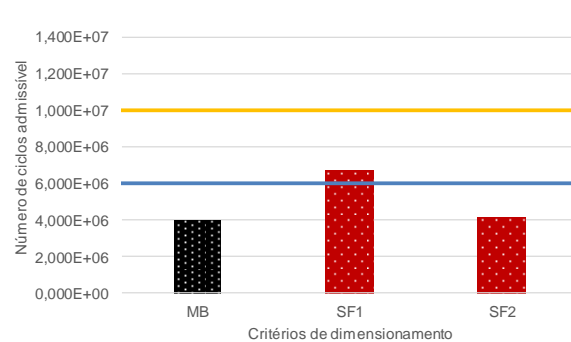


b) Classe de tráfego T7

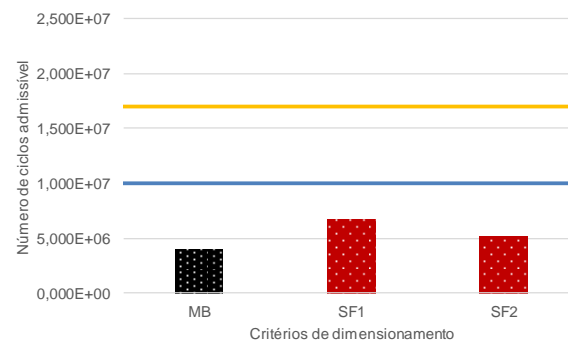


c) Classe de tráfego T8

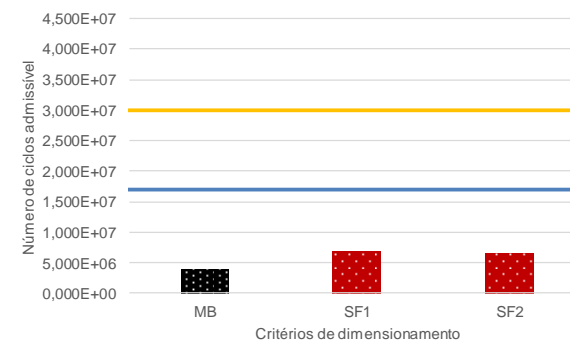
Figura II. 3 – Catálogo D1 do SATCC – Camada de base e sub-base granular - Classe de Solos S3 - Verificação estrutural realizada de acordo com o SAPEM (Categoria A)



a) Classe de tráfego T6

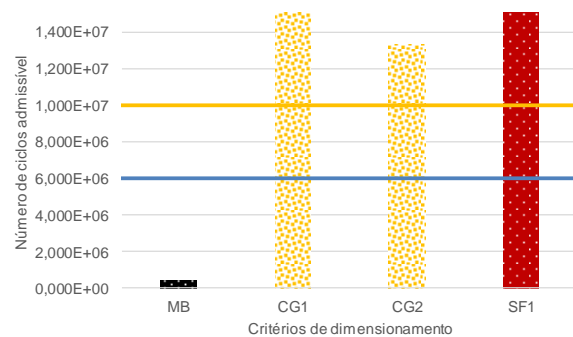


b) Classe de tráfego T7

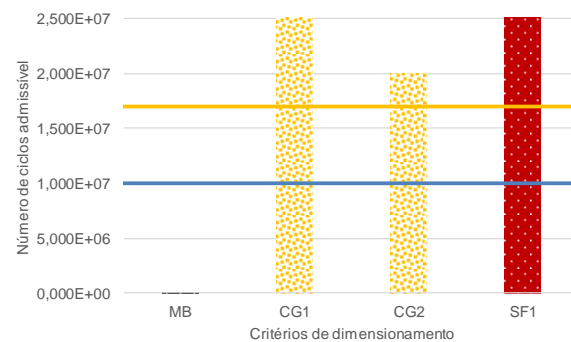


c) Classe de tráfego T8

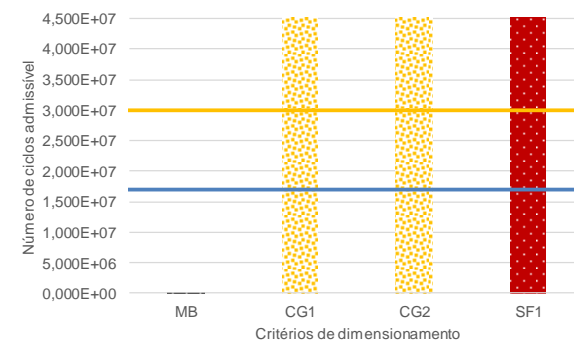
Figura II. 4 – Catálogo D1 do SATCC – Camada de base e sub-base granular - Classe de Solos S3 - Verificação estrutural realizada de acordo com a metodologia Portuguesa



a) Classe de tráfego T6

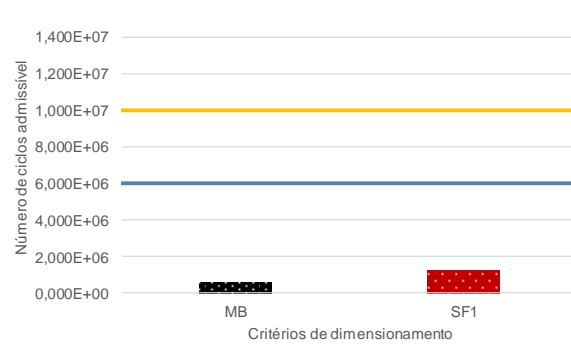


b) Classe de tráfego T7

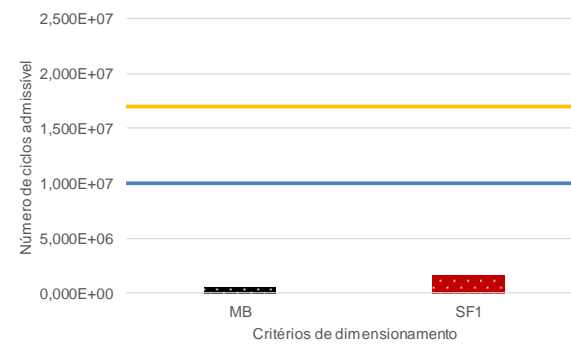


c) Classe de tráfego T8

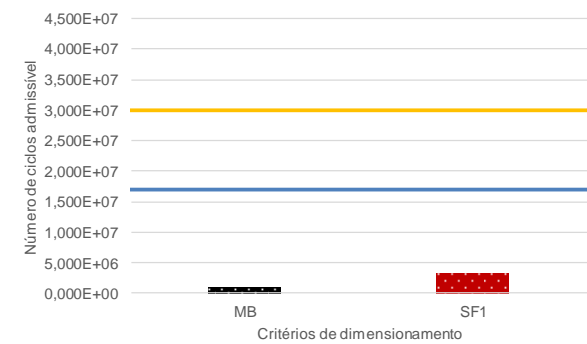
Figura II. 5 – Catálogo D1 do SATCC – Camada de base e sub-base granular - Classe de Solos S4 - Verificação estrutural realizada de acordo com o SAPEM (Categoria A)



a) Classe de tráfego T6

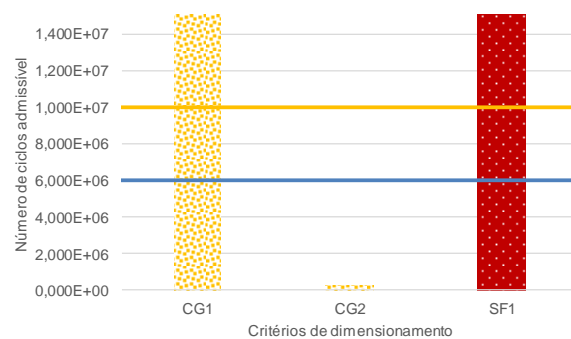


b) Classe de tráfego T7

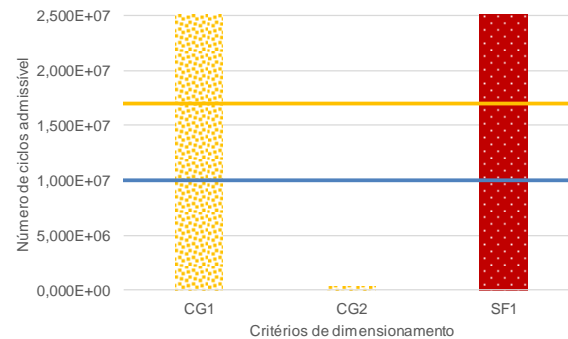


c) Classe de tráfego T8

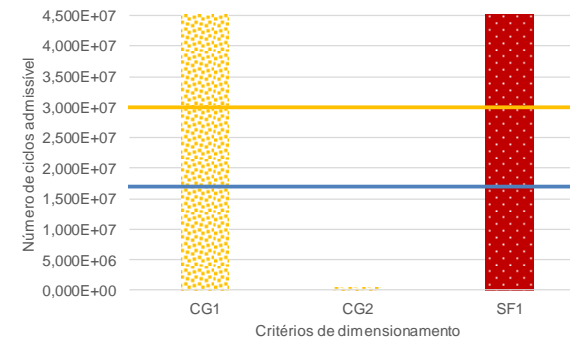
Figura II. 6 – Catálogo D1 do SATCC – Camada de base e sub-base granular - Classe de Solos S4 - Verificação estrutural realizada de acordo com a metodologia Portuguesa



a) Classe de tráfego T6

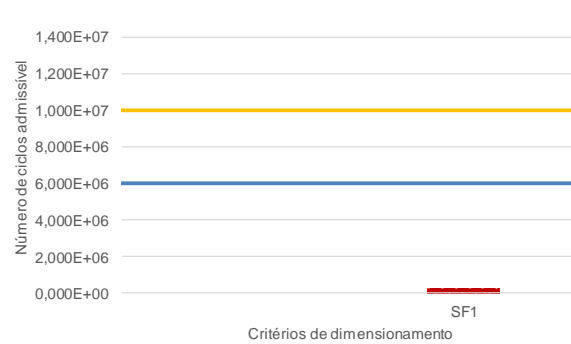


b) Classe de tráfego T7

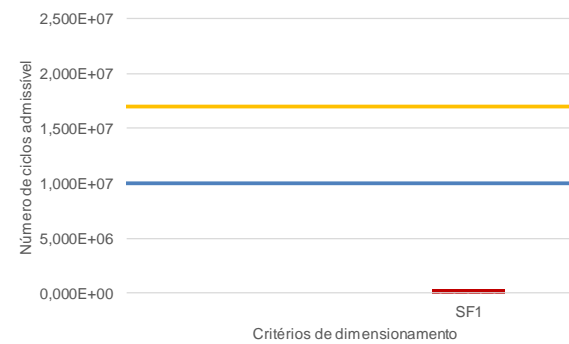


c) Classe de tráfego T8

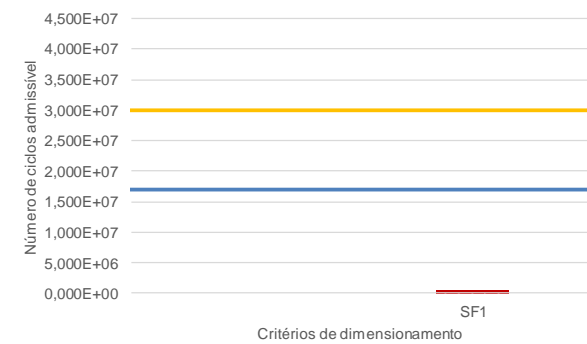
Figura II. 7 – Catálogo D1 do SATCC – Camada de base e sub-base granular - Classe de Solos S5 - Verificação estrutural realizada de acordo com o SAPEM (Categoria A)



a) Classe de tráfego T6



b) Classe de tráfego T7



c) Classe de tráfego T8

Figura II. 8 – Catálogo D1 do SATCC – Camada de base e sub-base granular - Classe de Solos S5 - Verificação estrutural realizada de acordo com a metodologia Portuguesa

Catálogo D4 (base em misturas betuminosas e sub-base do tipo granular) – Classes de solos entre S2 e S5 – Classes de tráfego entre T6 e T8

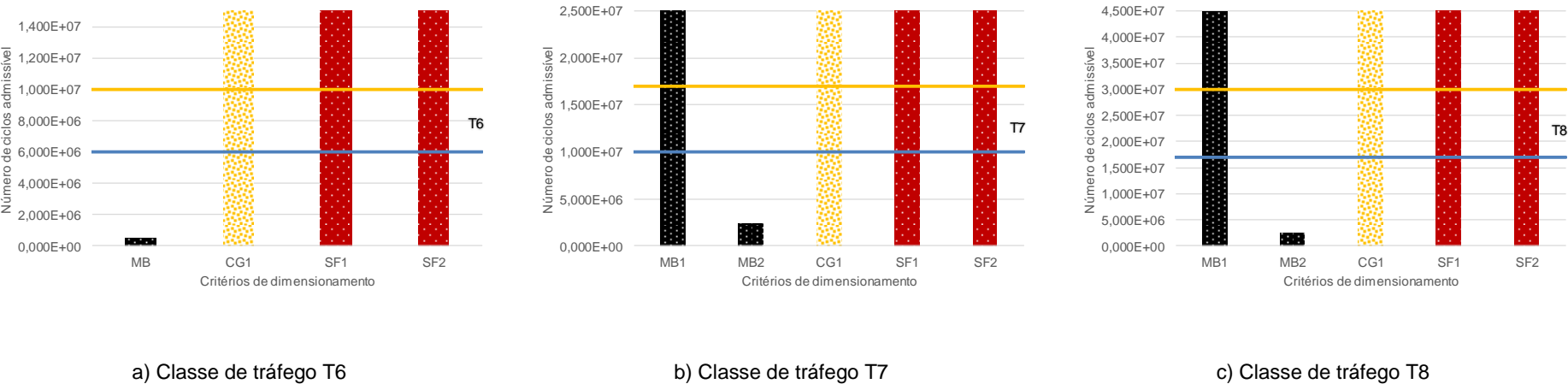
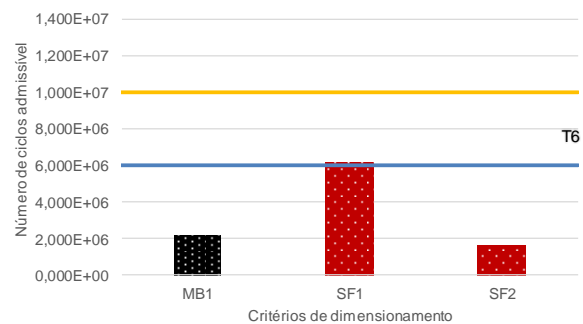
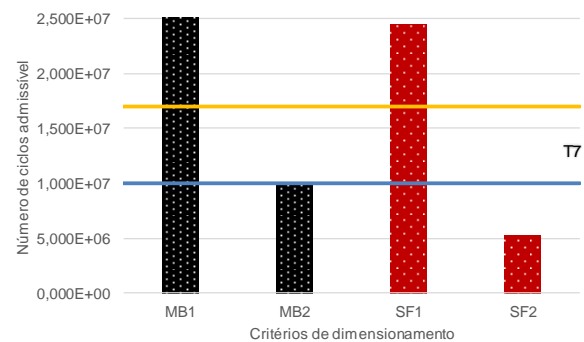


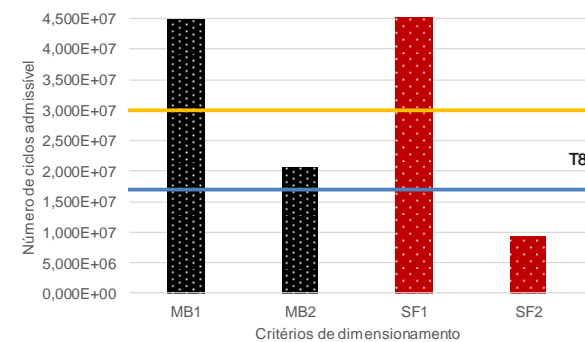
Figura II. 9 – Catálogo D4 do SATCC – base em misturas betuminosas e sub-base granular - Classe de Solos S2 - Verificação estrutural realizada de acordo com o SAPEM (Categoria A)



a) Classe de tráfego T6

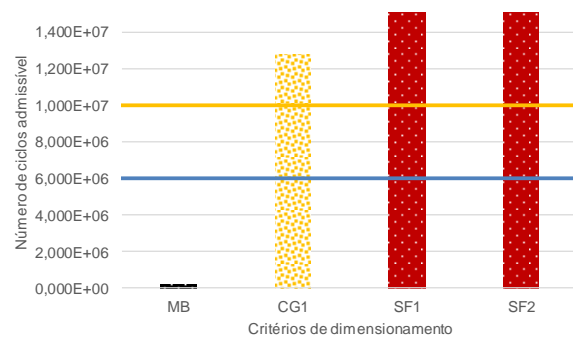


b) Classe de tráfego T7

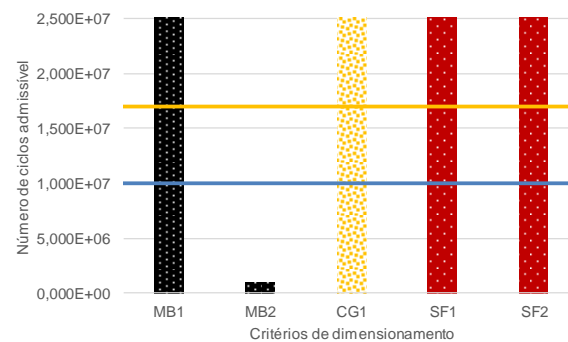


c) Classe de tráfego T8

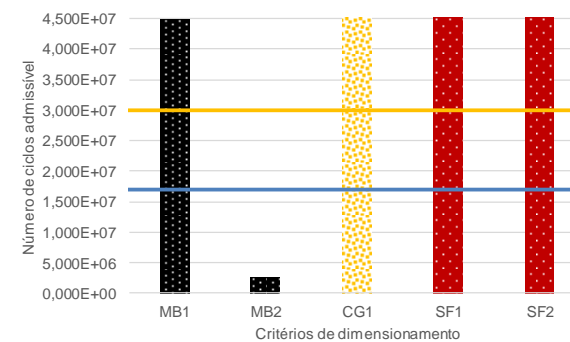
Figura II. 10 – Catálogo D4 do SATCC – base em misturas betuminosas e sub-base granular - Classe de Solos S2 - Verificação estrutural realizada de acordo com a metodologia Portuguesa



a) Classe de tráfego T6

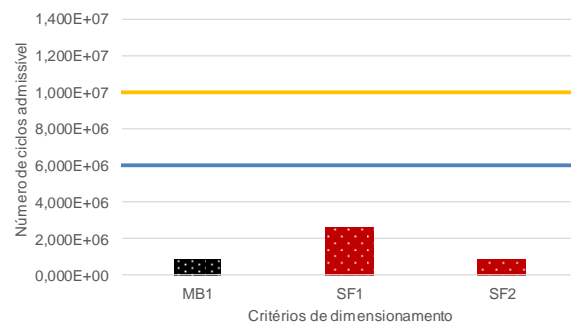


b) Classe de tráfego T7

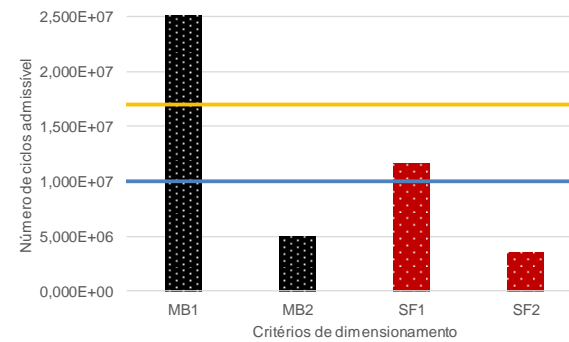


c) Classe de tráfego T8

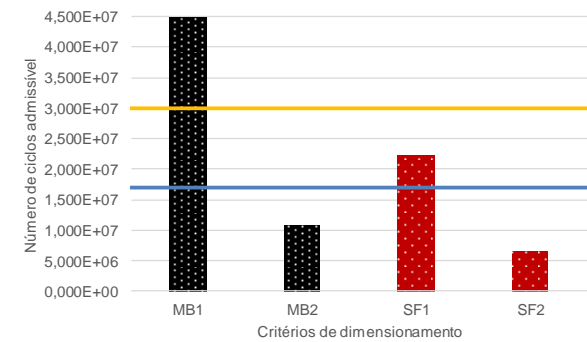
Figura II. 11 – Catálogo D4 do SATCC – base em misturas betuminosas e sub-base granular - Classe de Solos S3 - Verificação estrutural realizada de acordo com o SAPEM (Categoria A)



a) Classe de tráfego T6

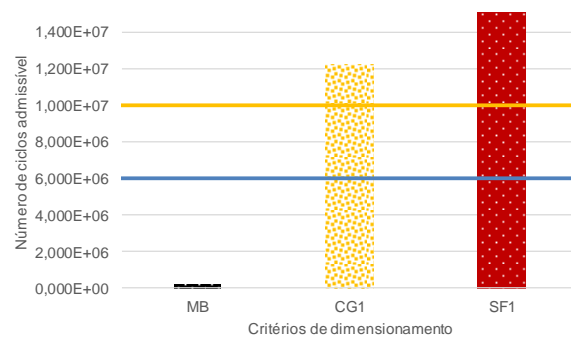


b) Classe de tráfego T7

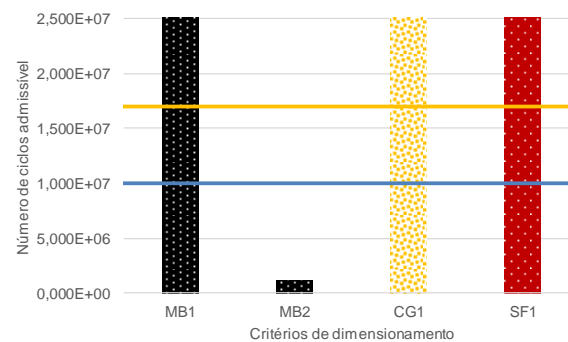


c) Classe de tráfego T8

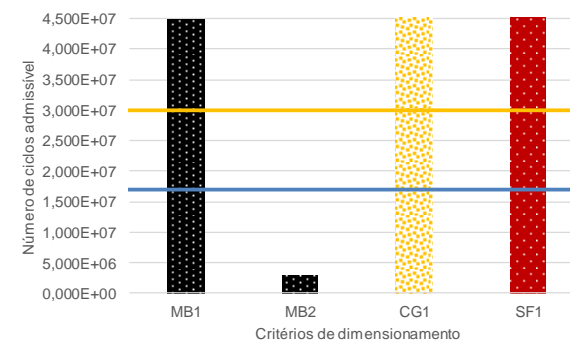
Figura II. 12 – Catálogo D4 do SATCC – base em misturas betuminosas e sub-base granular - Classe de Solos S3 - Verificação estrutural realizada de acordo com a metodologia Portuguesa



a) Classe de tráfego T6

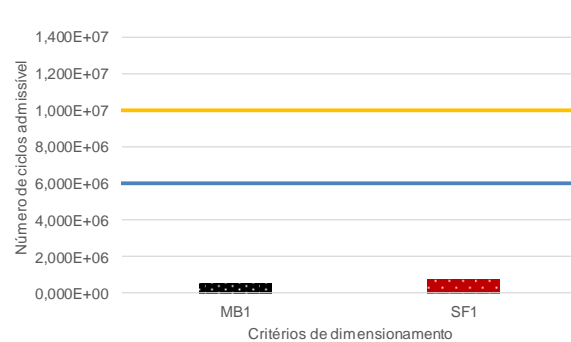


b) Classe de tráfego T7

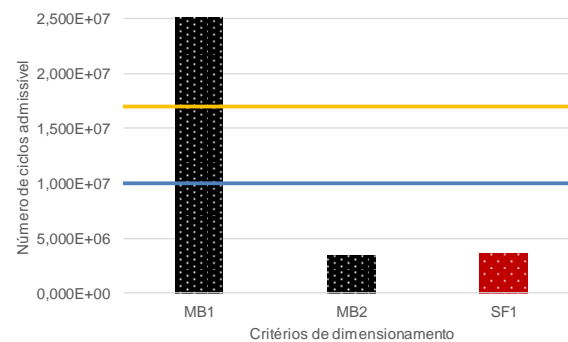


c) Classe de tráfego T8

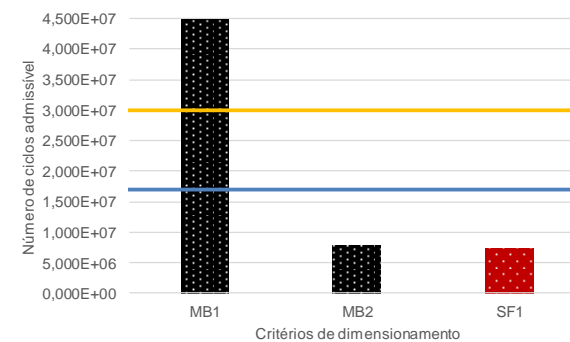
Figura II. 13 – Catálogo D4 do SATCC – base em misturas betuminosas e sub-base granular - Classe de Solos S4 - Verificação estrutural realizada de acordo com o SAPEM (Categoria A)



a) Classe de tráfego T6

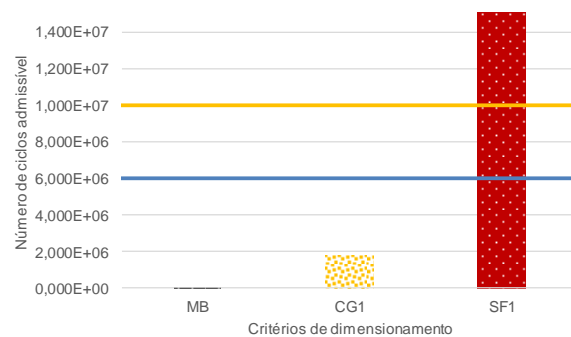


b) Classe de tráfego T7

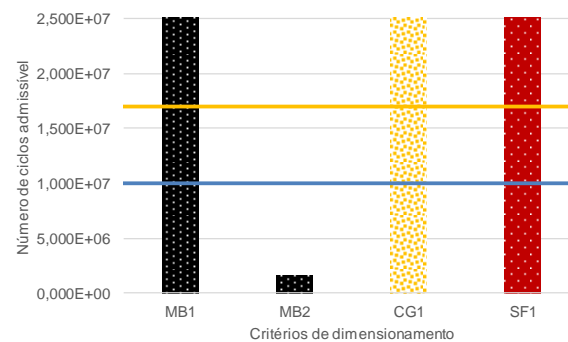


c) Classe de tráfego T8

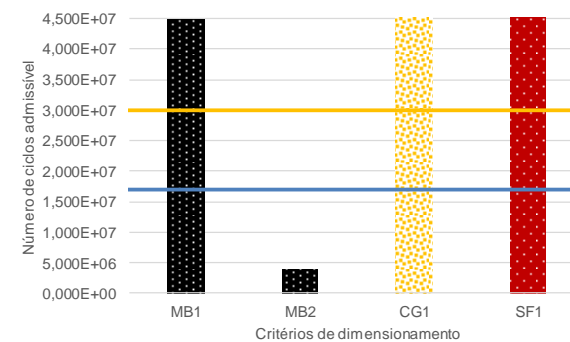
Figura II. 14 – Catálogo D4 do SATCC – base em misturas betuminosas e sub-base granular - Classe de Solos S4 - Verificação estrutural realizada de acordo com a metodologia Portuguesa



a) Classe de tráfego T6

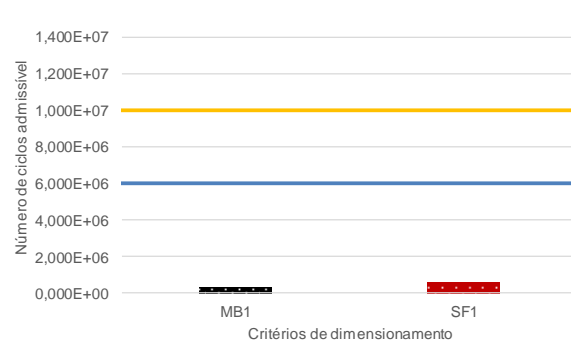


b) Classe de tráfego T7

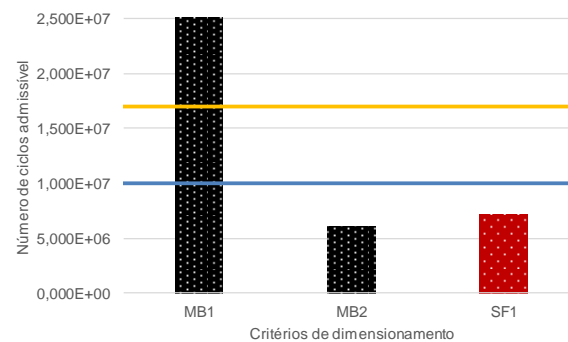


c) Classe de tráfego T8

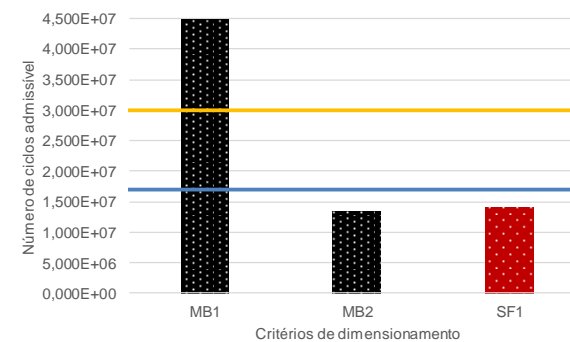
Figura II. 15 – Catálogo D4 do SATCC – base em misturas betuminosas e sub-base granular - Classe de Solos S5 - Verificação estrutural realizada de acordo com o SAPEM (Categoria A)



a) Classe de tráfego T6



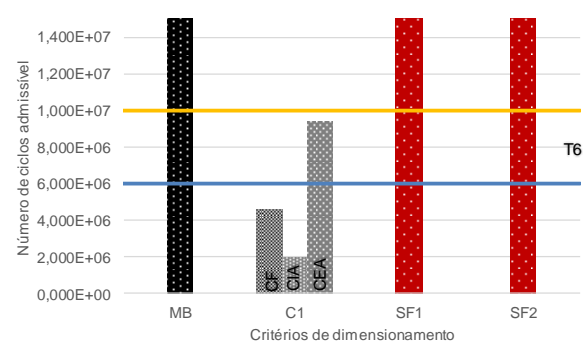
b) Classe de tráfego T7



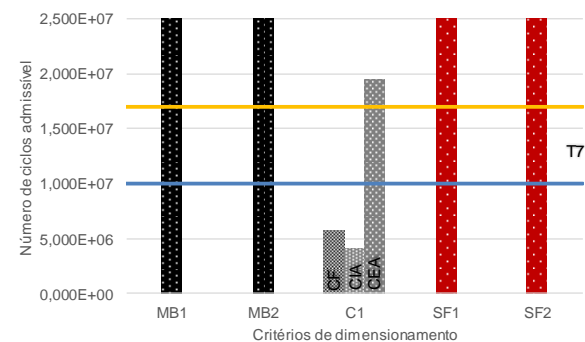
c) Classe de tráfego T8

Figura II. 16 – Catálogo D4 do SATCC – base em misturas betuminosas e sub-base granular - Classe de Solos S5 - Verificação estrutural realizada de acordo com a metodologia Portuguesa

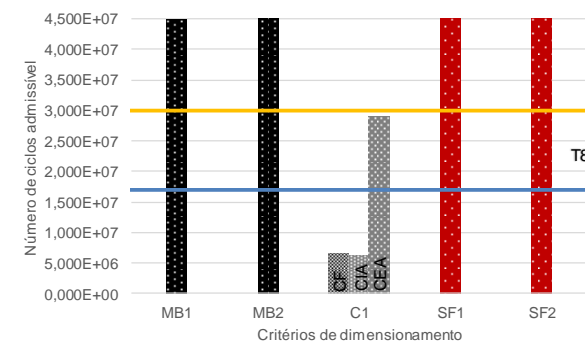
Catálogo D5 (base em misturas betuminosas e sub-base estabilizada com cimento) – Classes de solos entre S2 e S5 – Classes de tráfego entre T6 e T8



a) Classe de tráfego T6

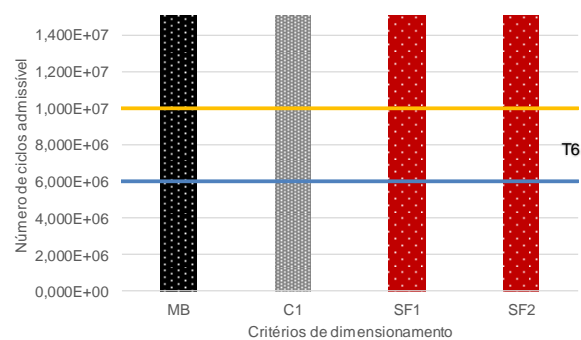


b) Classe de tráfego T7

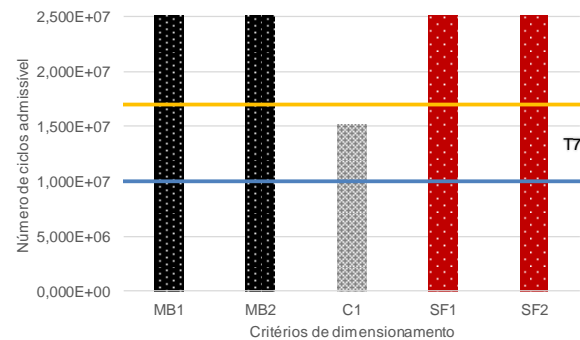


c) Classe de tráfego T8

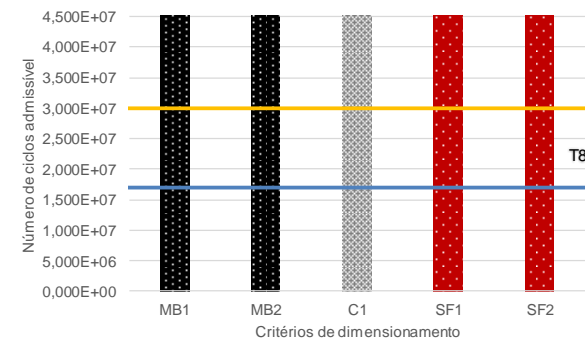
Figura II. 17 – Catálogo D5 do SATCC – base em misturas betuminosas e sub-base estabilizada com cimento - Classe de Solos S2 - Verificação estrutural realizada de acordo com o SAPEM (Categoria A)



a) Classe de tráfego T6

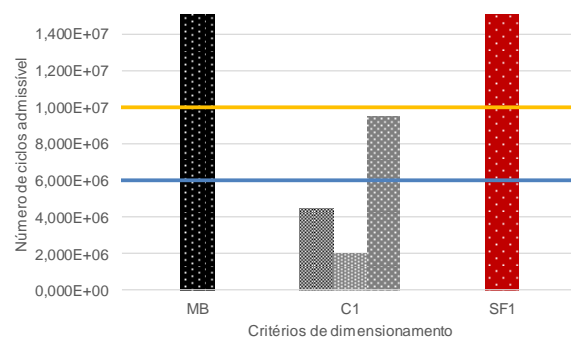


b) Classe de tráfego T7

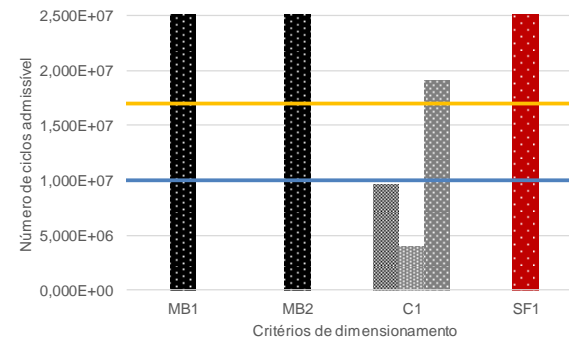


c) Classe de tráfego T8

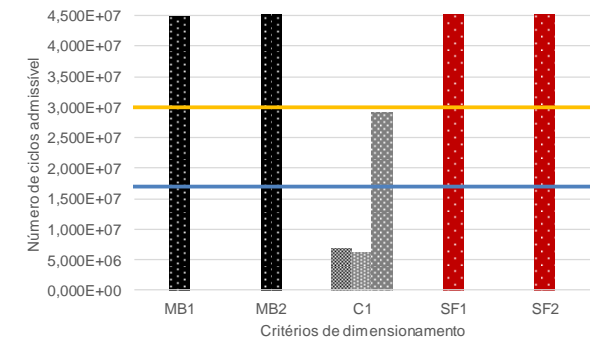
Figura II. 18 – Catálogo D5 do SATCC – base em misturas betuminosas e sub-base estabilizada com cimento - Classe de Solos S2 - Verificação estrutural realizada de acordo com a metodologia Portuguesa



a) Classe de tráfego T6

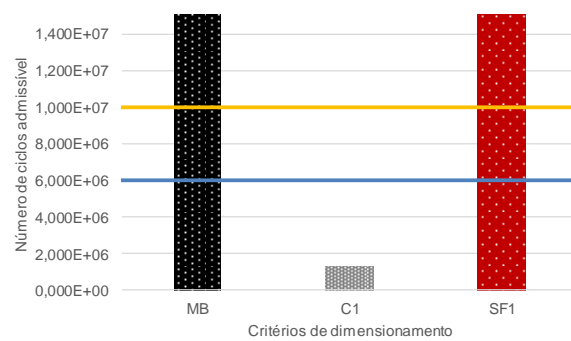


b) Classe de tráfego T7

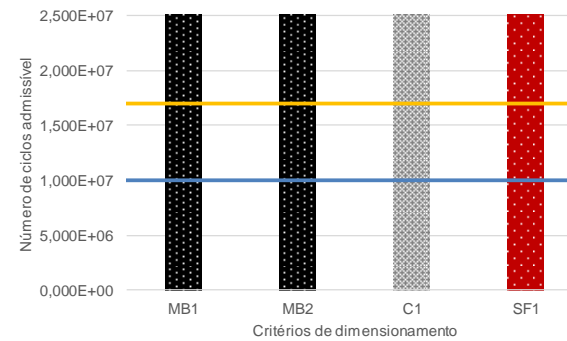


c) Classe de tráfego T8

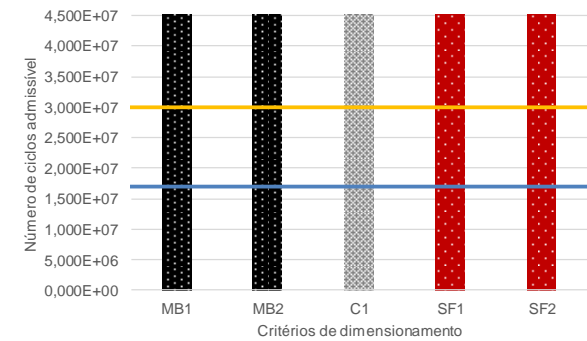
Figura II. 19 – Catálogo D5 do SATCC – base em misturas betuminosas e sub-base estabilizada com cimento - Classe de Solos S3 - Verificação estrutural realizada de acordo com o SAPEM (Categoria A)



a) Classe de tráfego T6

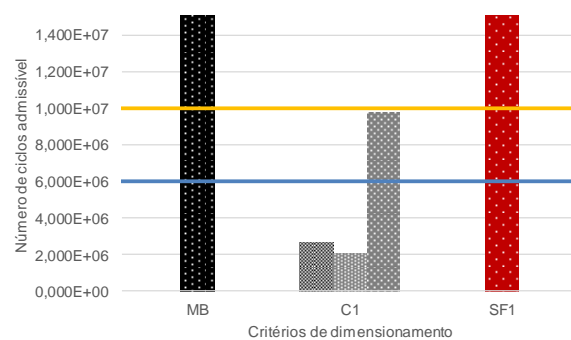


b) Classe de tráfego T7

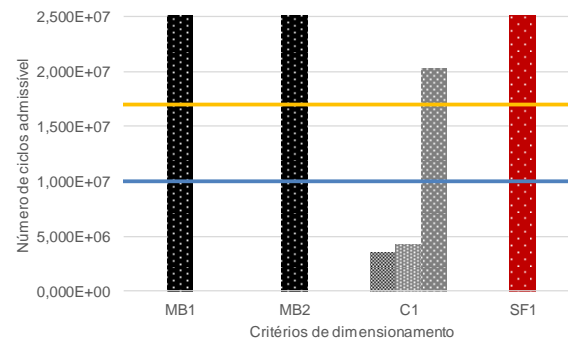


c) Classe de tráfego T8

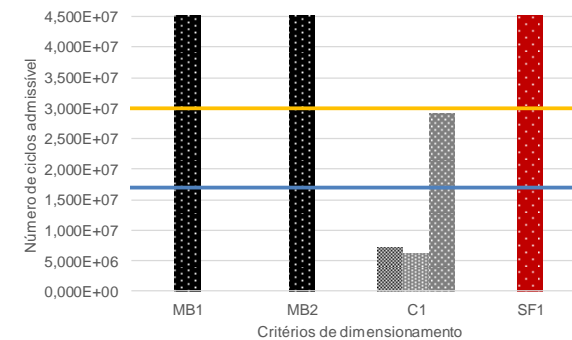
Figura II. 20 – Catálogo D5 do SATCC – base em misturas betuminosas e sub-base estabilizada com cimento - Classe de Solos S3 - Verificação estrutural realizada de acordo com a metodologia Portuguesa



a) Classe de tráfego T6

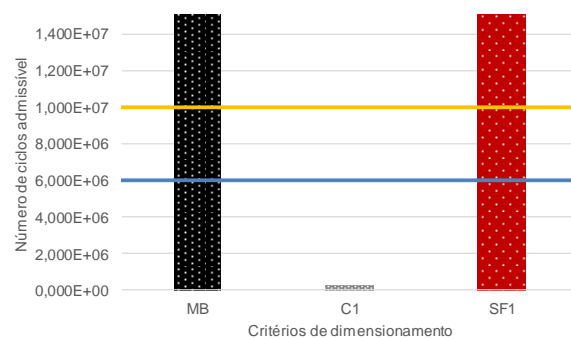


b) Classe de tráfego T7

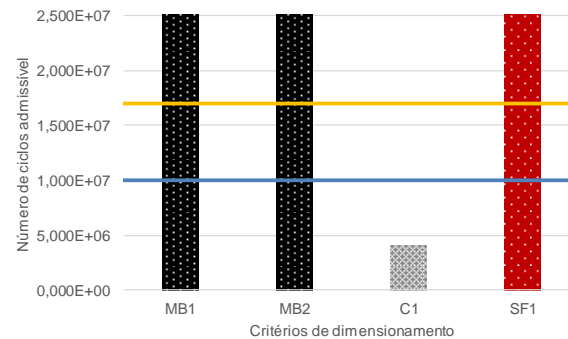


c) Classe de tráfego T8

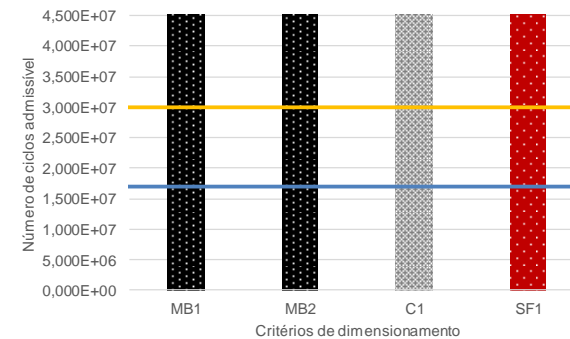
Figura II. 21 – Catálogo D5 do SATCC – base em misturas betuminosas e sub-base estabilizada com cimento - Classe de Solos S4 - Verificação estrutural realizada de acordo com o SAPEM (Categoria A)



a) Classe de tráfego T6

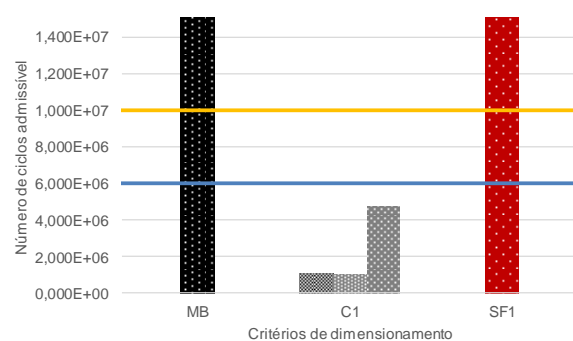


b) Classe de tráfego T7

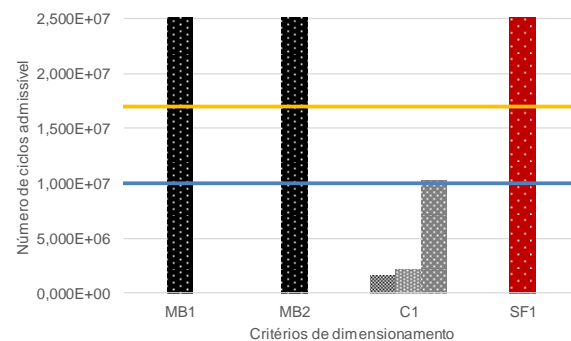


c) Classe de tráfego T8

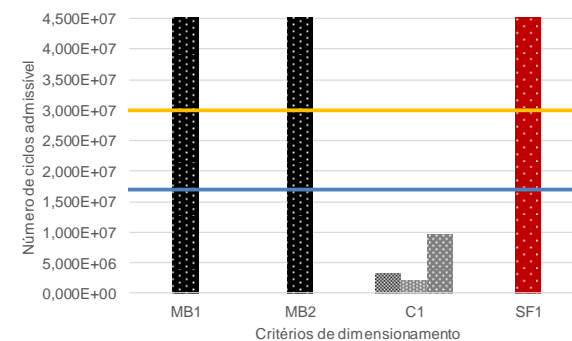
Figura II. 22 – Catálogo D5 do SATCC – base em misturas betuminosas e sub-base estabilizada com cimento - Classe de Solos S4 - Verificação estrutural realizada de acordo com a metodologia Portuguesa



a) Classe de tráfego T6

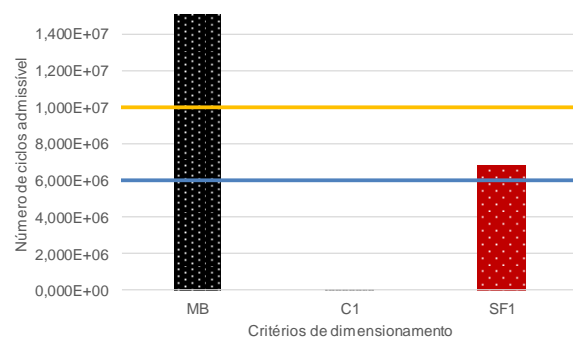


b) Classe de tráfego T7

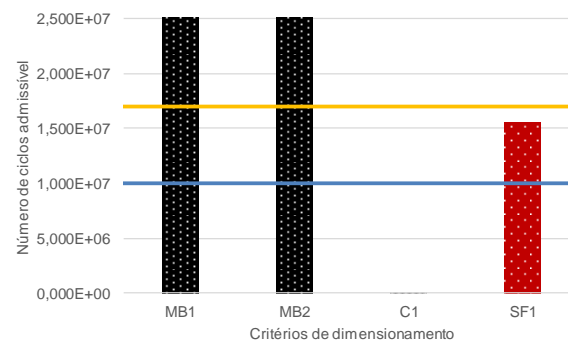


c) Classe de tráfego T8

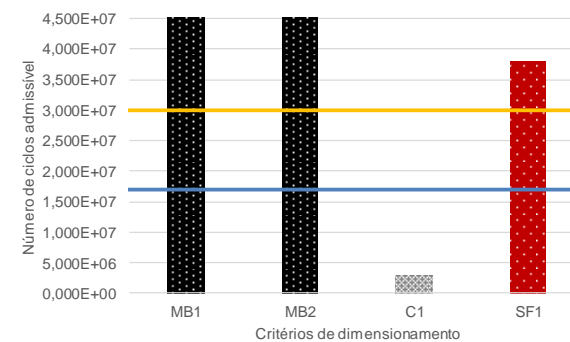
Figura II. 23 – Catálogo D5 do SATCC – base em misturas betuminosas e sub-base estabilizada com cimento - Classe de Solos S5 - Verificação estrutural realizada de acordo com o SAPEM (Categoria A)



a) Classe de tráfego T6



b) Classe de tráfego T7



c) Classe de tráfego T8

Figura II. 24 – Catálogo D5 do SATCC – base em misturas betuminosas e sub-base estabilizada com cimento - Classe de Solos S5 - Verificação estrutural realizada de acordo com a metodologia Portuguesa

Catálogo W1 (camada de base e sub-base do tipo granular) – Classes de solos entre S2 e S5 – Classes de tráfego entre T6 e T8

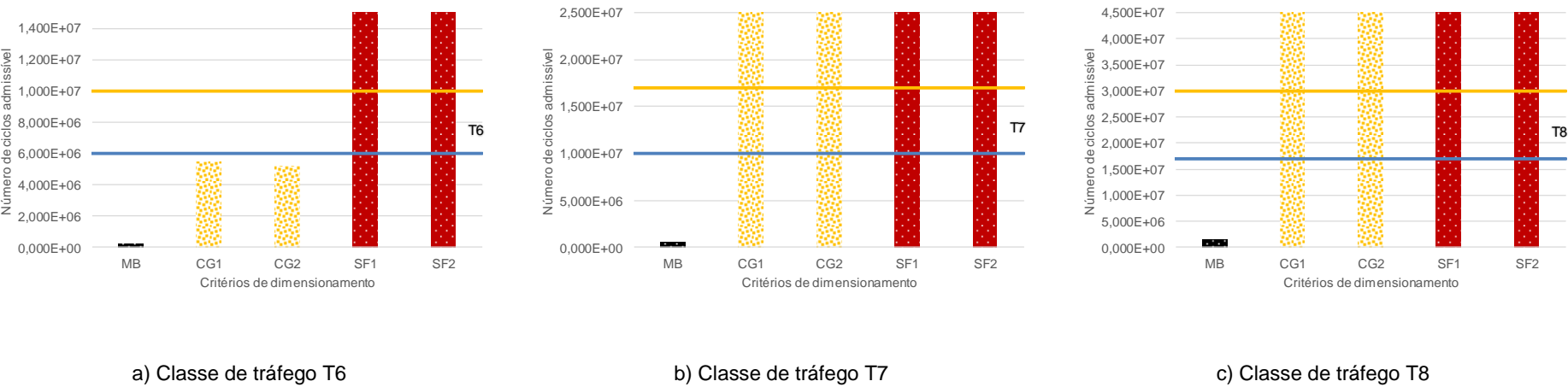
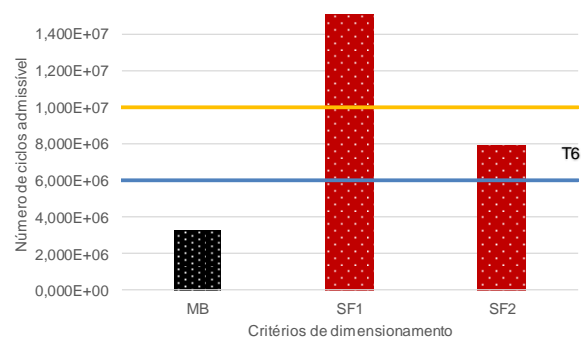
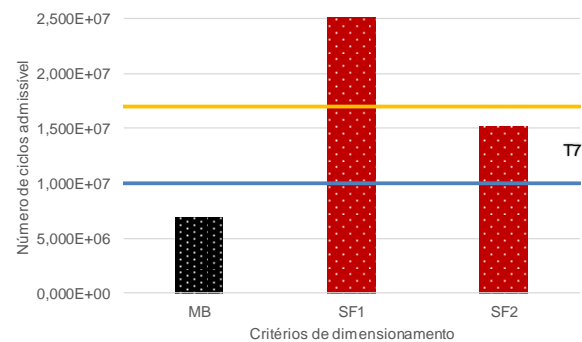


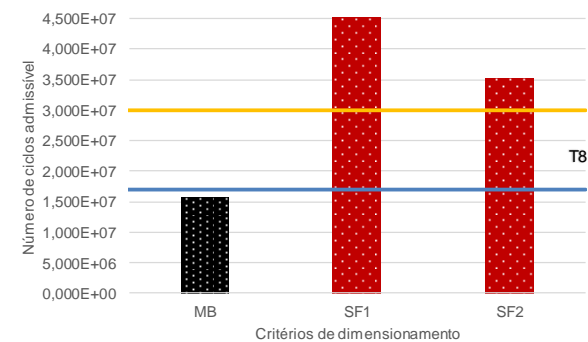
Figura II. 25 – Catálogo W1 do SATCC – Camada de base e sub-base granular - Classe de Solos S2 - Verificação estrutural realizada de acordo com o SAPEM (Categoria A)



a) Classe de tráfego T6

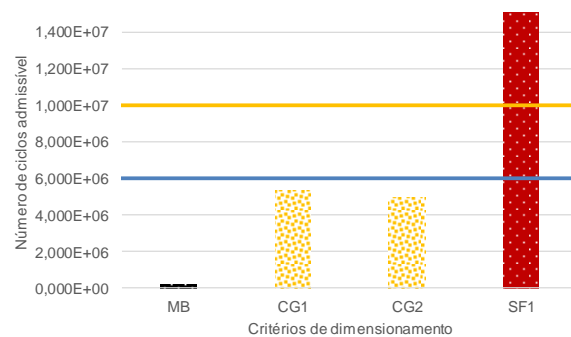


b) Classe de tráfego T7

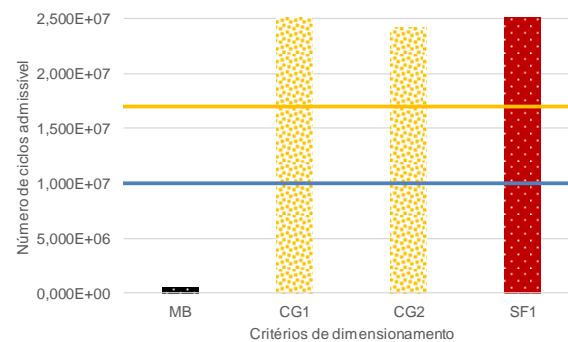


c) Classe de tráfego T8

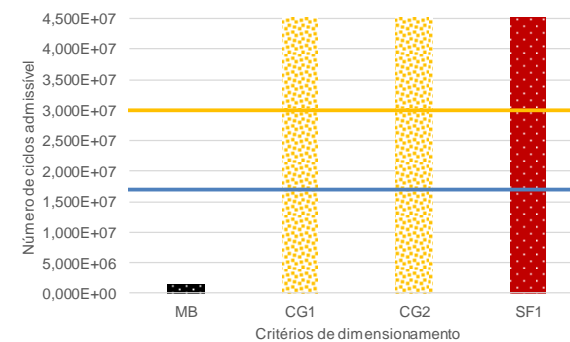
Figura II. 26 – Catálogo W1 do SATCC – Camada de base e sub-base granular - Classe de Solos S2 - Verificação estrutural realizada de acordo com a metodologia Portuguesa



a) Classe de tráfego T6

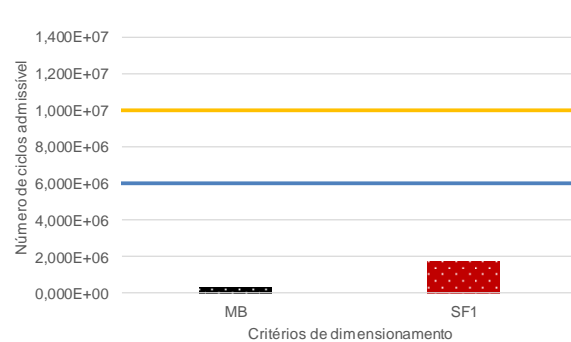


b) Classe de tráfego T7

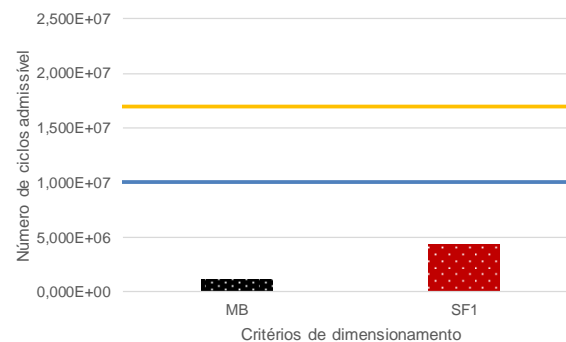


c) Classe de tráfego T8

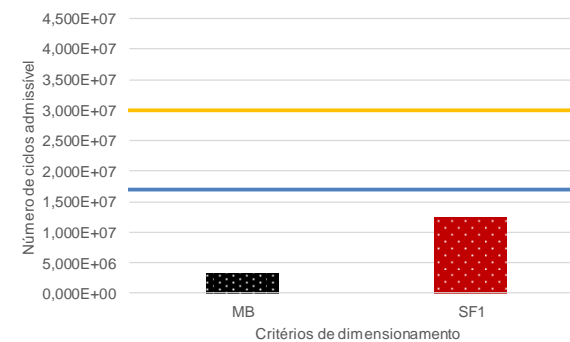
Figura II. 27 – Catálogo W1 do SATCC – Camada de base e sub-base granular - Classe de Solos S3 - Verificação estrutural realizada de acordo com o SAPEM (Categoria A)



a) Classe de tráfego T6

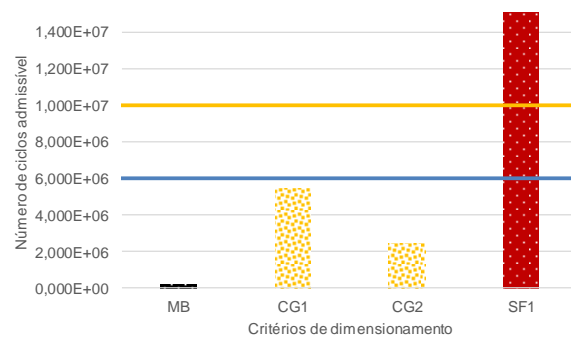


b) Classe de tráfego T7

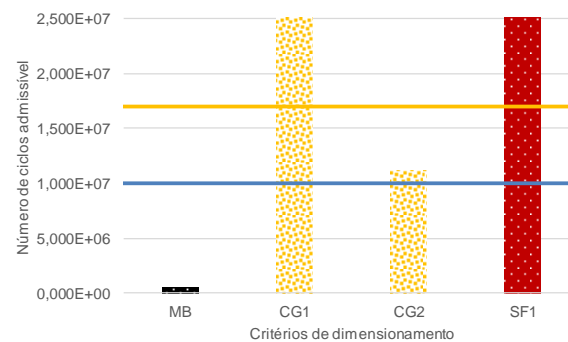


c) Classe de tráfego T8

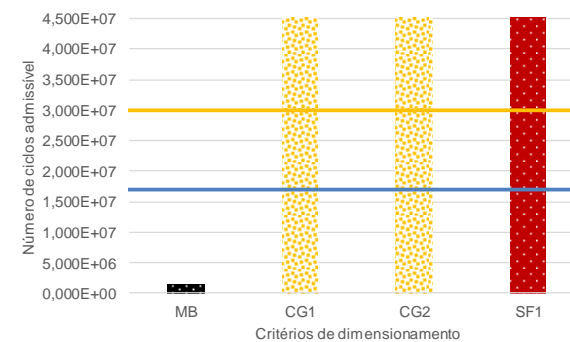
Figura II. 28 – Catálogo W1 do SATCC – Camada de base e sub-base granular - Classe de Solos S3 - Verificação estrutural realizada de acordo com a metodologia Portuguesa



a) Classe de tráfego T6

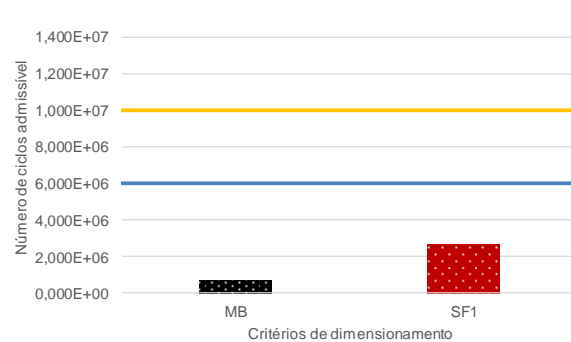


b) Classe de tráfego T7

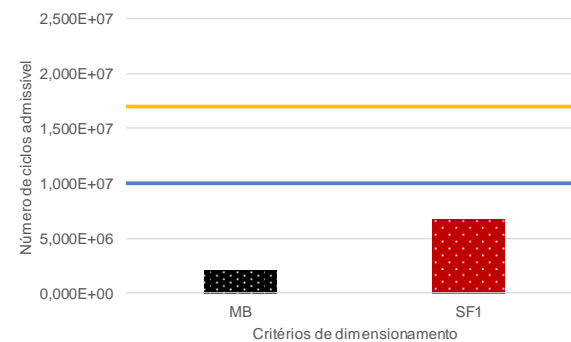


c) Classe de tráfego T8

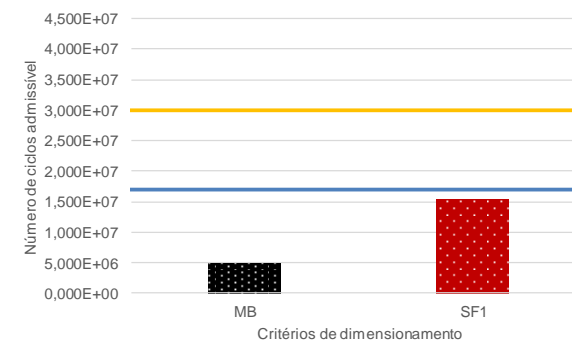
Figura II. 29 – Catálogo W1 do SATCC – Camada de base e sub-base granular - Classe de Solos S4 - Verificação estrutural realizada de acordo com o SAPEM (Categoria A)



a) Classe de tráfego T6

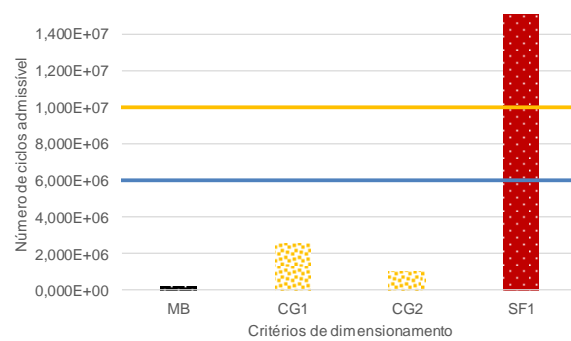


b) Classe de tráfego T7

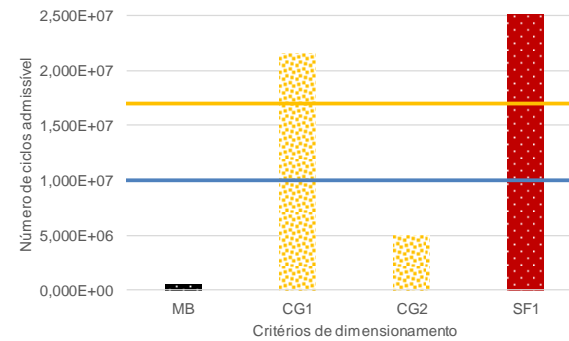


c) Classe de tráfego T8

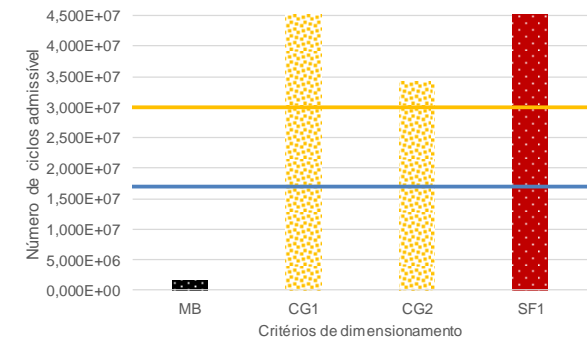
Figura II. 30 – Catálogo W1 do SATCC – Camada de base e sub-base granular - Classe de Solos S4 - Verificação estrutural realizada de acordo com a metodologia Portuguesa



a) Classe de tráfego T6

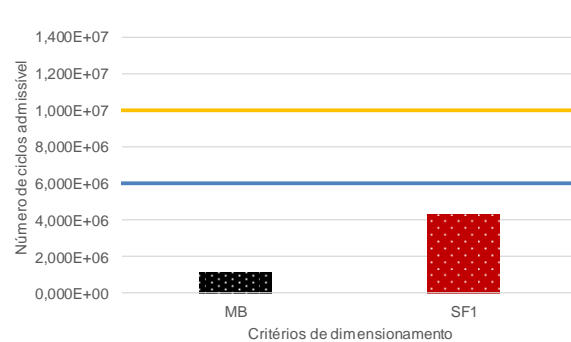


b) Classe de tráfego T7

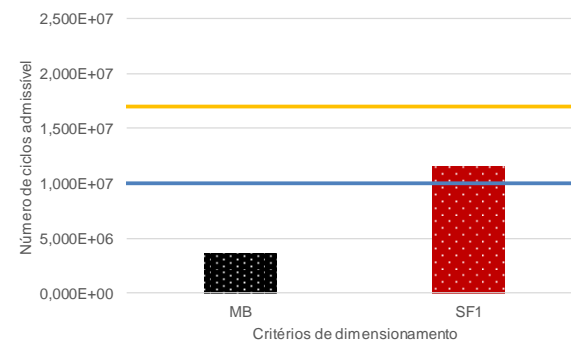


c) Classe de tráfego T8

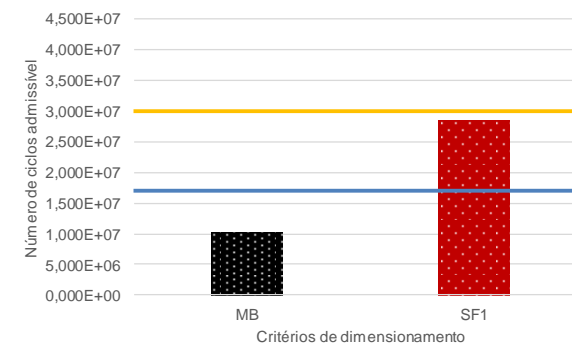
Figura II. 31 – Catálogo W1 do SATCC – Camada de base e sub-base granular - Classe de Solos S5 - Verificação estrutural realizada de acordo com o SAPEM (Categoria A)



a) Classe de tráfego T6



b) Classe de tráfego T7



c) Classe de tráfego T8

Figura II. 32 – Catálogo W1 do SATCC – Camada de base e sub-base granular - Classe de Solos S5 - Verificação estrutural realizada de acordo com a metodologia Portuguesa

Catálogo W4 (base em misturas betuminosas e sub-base do tipo granular) – Classes de solos entre S2 e S5 – Classes de tráfego entre T6 e T8

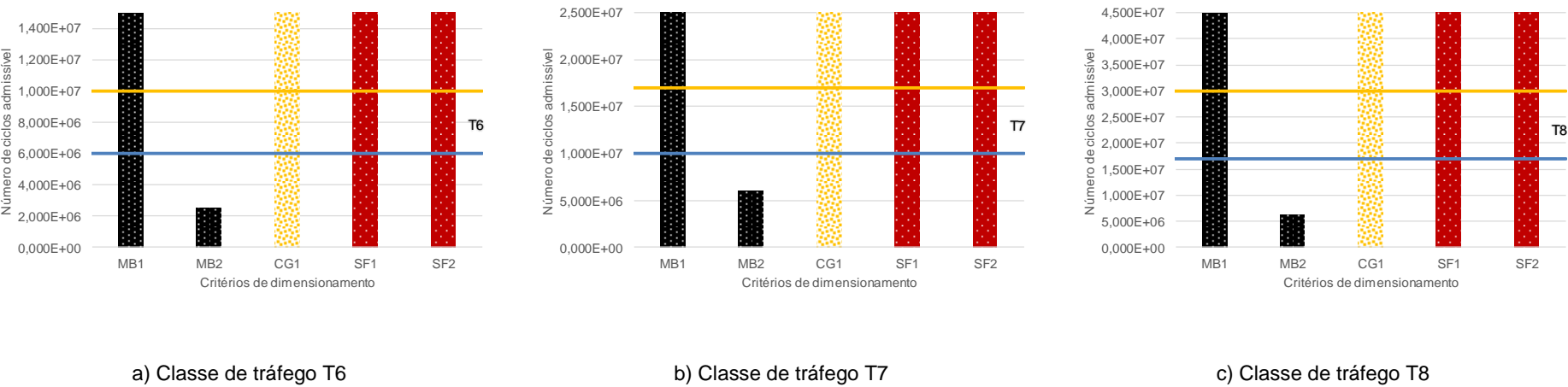
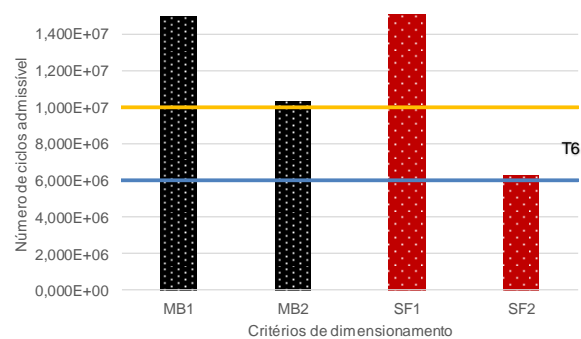
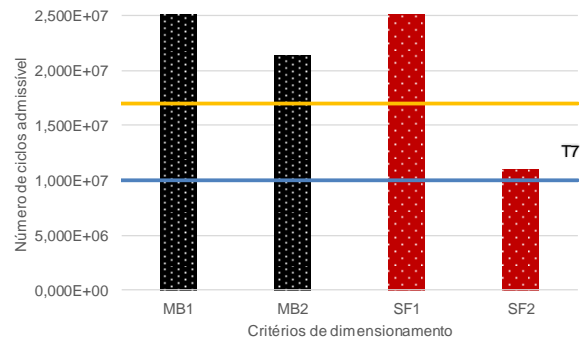


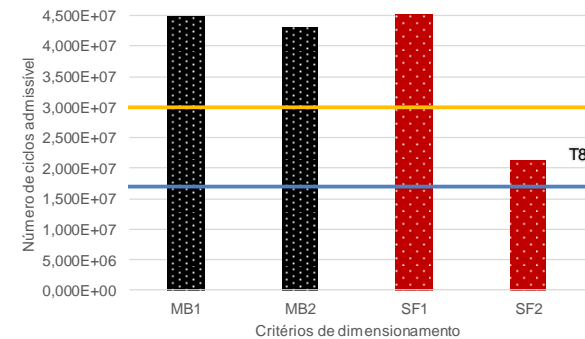
Figura II. 33 – Catálogo W4 do SATCC – base em misturas betuminosas e sub-base granular - Classe de Solos S2 - Verificação estrutural realizada de acordo com o SAPEM (Categoria A)



a) Classe de tráfego T6

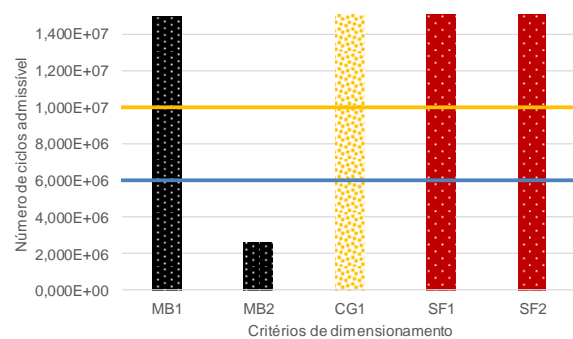


b) Classe de tráfego T7

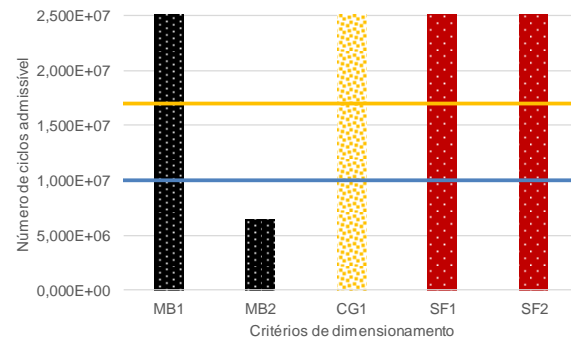


c) Classe de tráfego T8

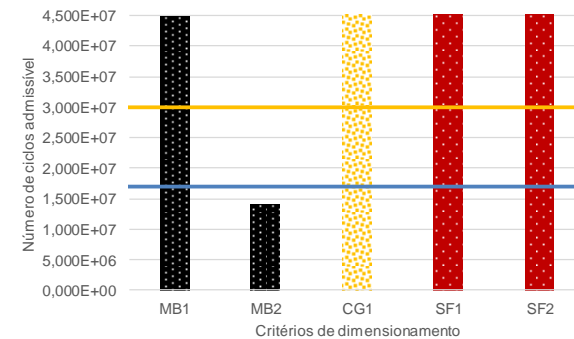
Figura II. 34 – Catálogo W4 do SATCC – base em misturas betuminosas e sub-base granular - Classe de Solos S2 - Verificação estrutural realizada de acordo com a metodologia Portuguesa



a) Classe de tráfego T6

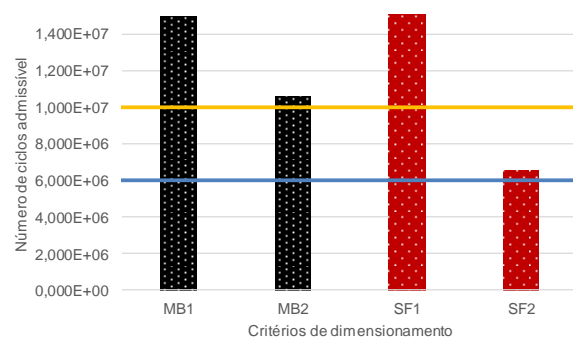


b) Classe de tráfego T7

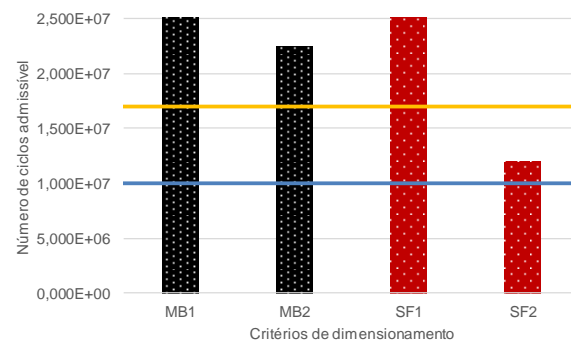


c) Classe de tráfego T8

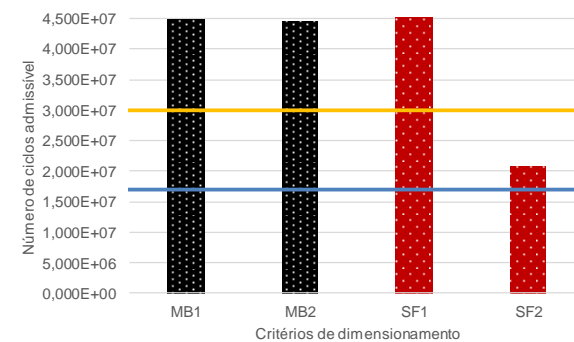
Figura II. 35 – Catálogo W4 do SATCC – base em misturas betuminosas e sub-base granular - Classe de Solos S3 - Verificação estrutural realizada de acordo com o SAPEM (Categoria A)



a) Classe de tráfego T6

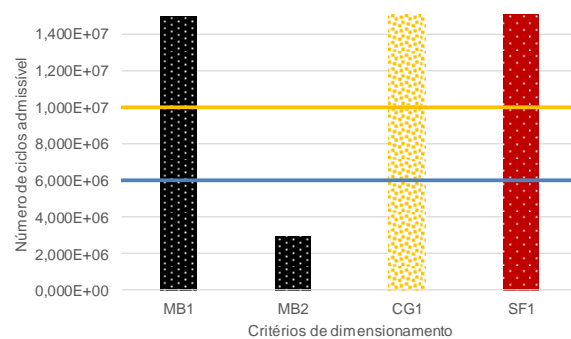


b) Classe de tráfego T7

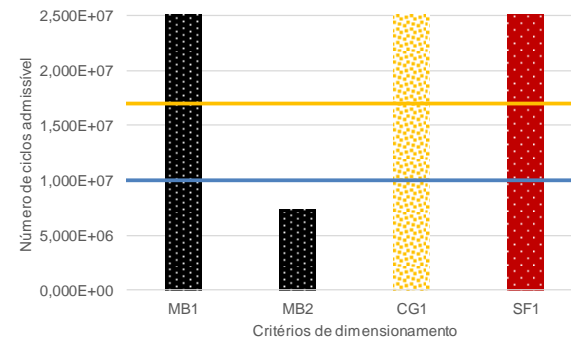


c) Classe de tráfego T8

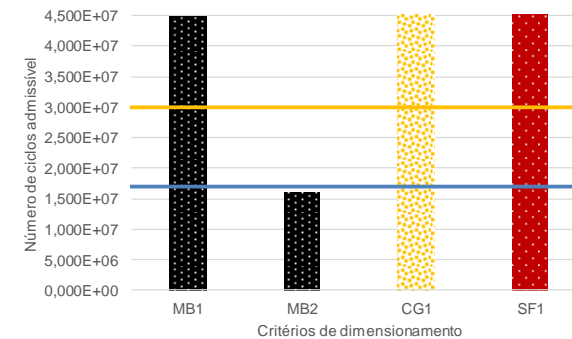
Figura II. 36 – Catálogo W4 do SATCC – base em misturas betuminosas e sub-base granular - Classe de Solos S3 - Verificação estrutural realizada de acordo com a metodologia Portuguesa



a) Classe de tráfego T6

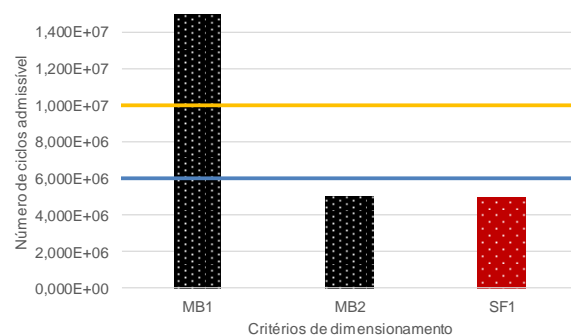


b) Classe de tráfego T7

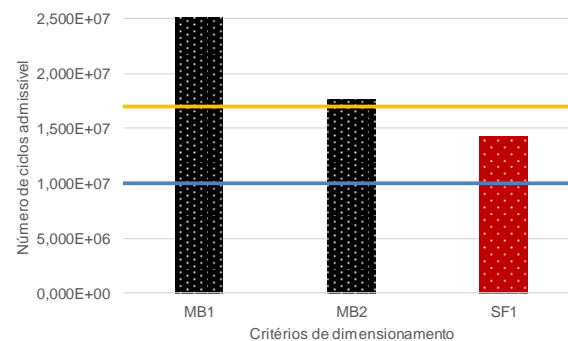


c) Classe de tráfego T8

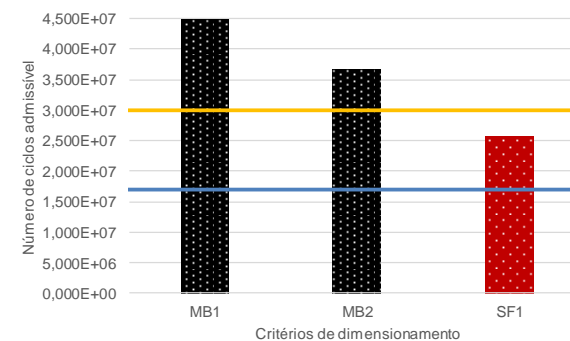
Figura II. 37 – Catálogo W4 do SATCC – base em misturas betuminosas e sub-base granular - Classe de Solos S4 - Verificação estrutural realizada de acordo com o SAPEM (Categoria A)



a) Classe de tráfego T6

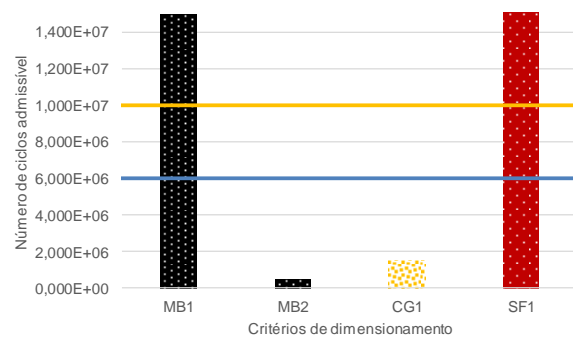


b) Classe de tráfego T7

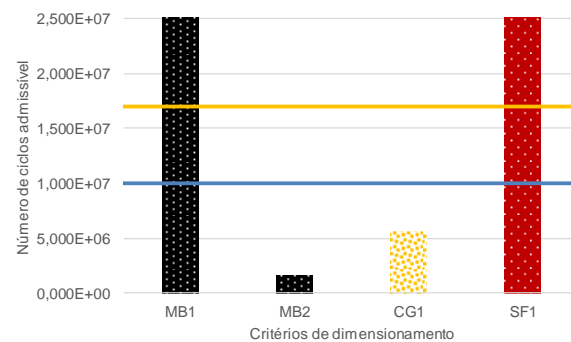


c) Classe de tráfego T8

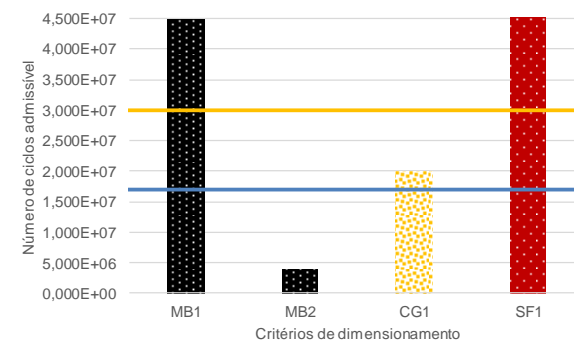
Figura II. 38 – Catálogo W4 do SATCC – base em misturas betuminosas e sub-base granular - Classe de Solos S4 - Verificação estrutural realizada de acordo com a metodologia Portuguesa



a) Classe de tráfego T6

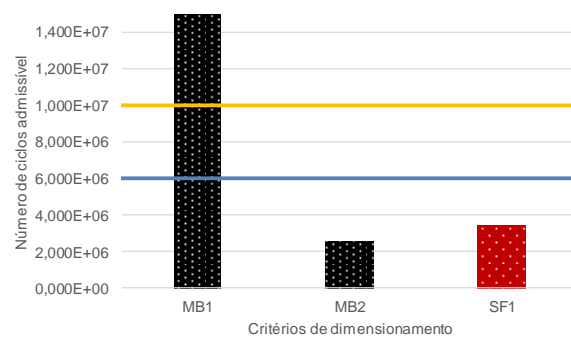


b) Classe de tráfego T7

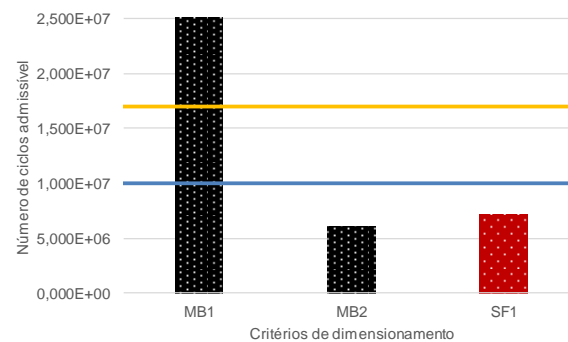


c) Classe de tráfego T8

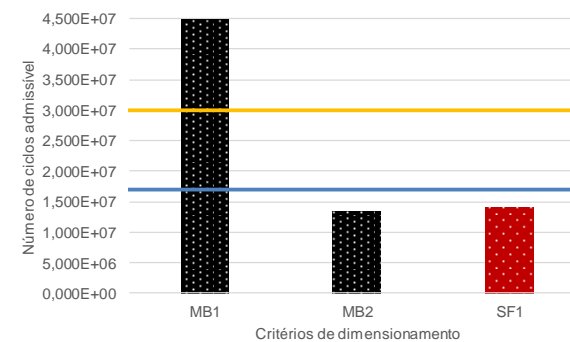
Figura II. 39 – Catálogo W4 do SATCC – base em misturas betuminosas e sub-base granular - Classe de Solos S5 - Verificação estrutural realizada de acordo com o SAPEM (Categoria A)



a) Classe de tráfego T6



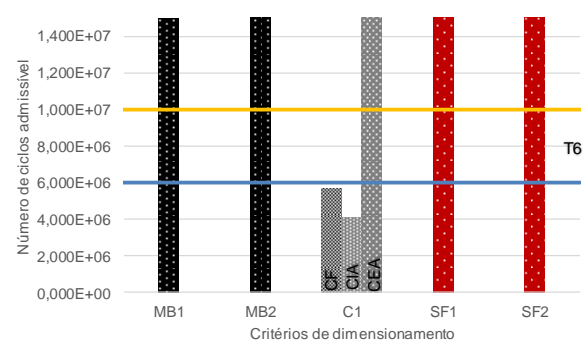
b) Classe de tráfego T7



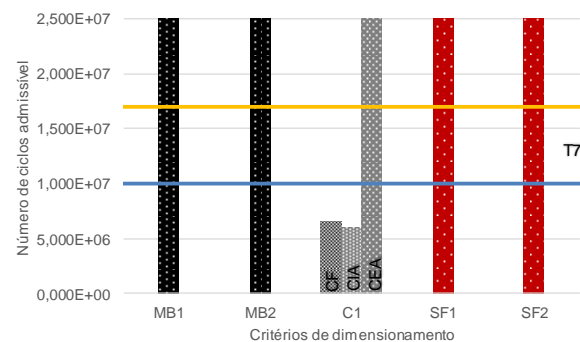
c) Classe de tráfego T8

Figura II. 40 – Catálogo W4 do SATCC – base em misturas betuminosas e sub-base granular - Classe de Solos S5 - Verificação estrutural realizada de acordo com a metodologia Portuguesa

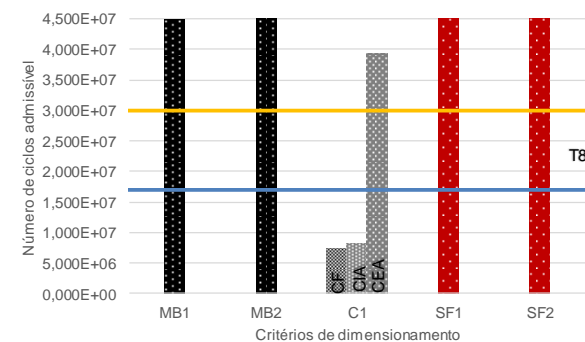
Catálogo W5 (base em misturas betuminosas e sub-base estabilizada com cimento) – Classes de solos entre S2 e S5 – Classes de tráfego entre T6 e T8



a) Classe de tráfego T6

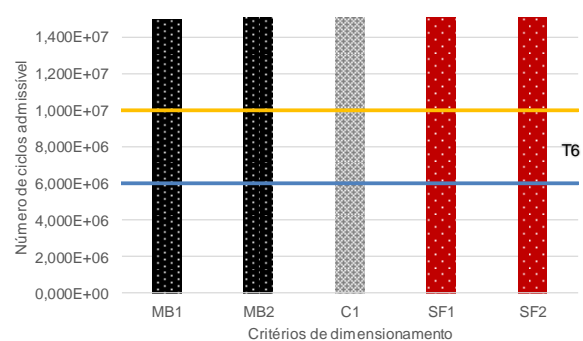


b) Classe de tráfego T7

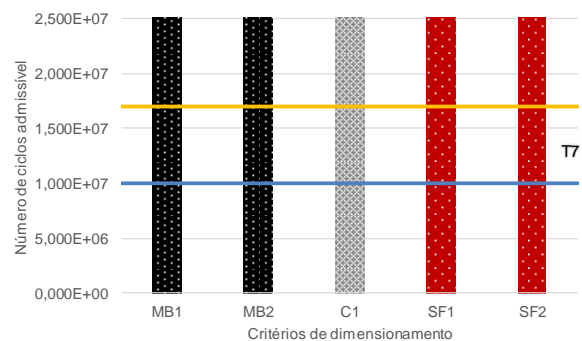


c) Classe de tráfego T8

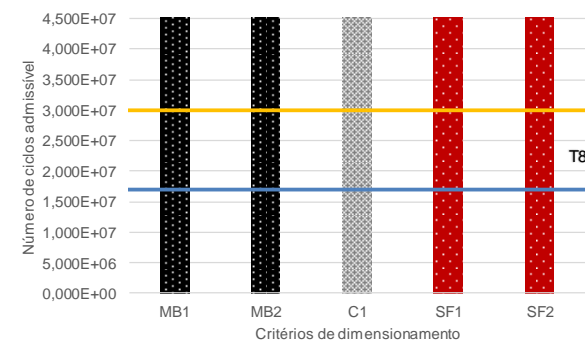
Figura II. 41 – Catálogo W5 do SATCC – base em misturas betuminosas e sub-base estabilizada com cimento - Classe de Solos S2 - Verificação estrutural realizada de acordo com o SAPEM (Categoria A)



a) Classe de tráfego T6

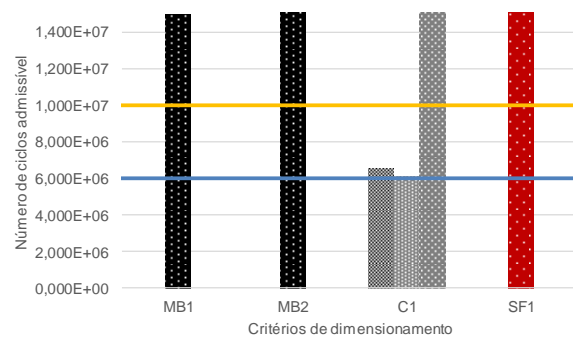


b) Classe de tráfego T7

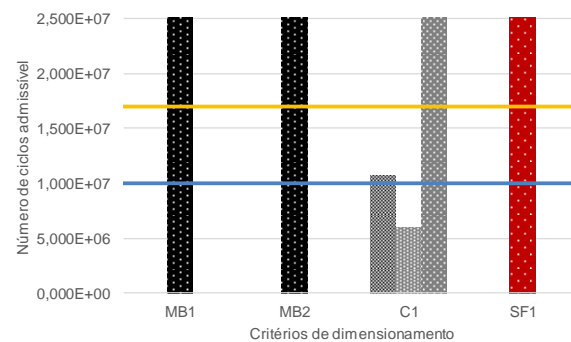


c) Classe de tráfego T8

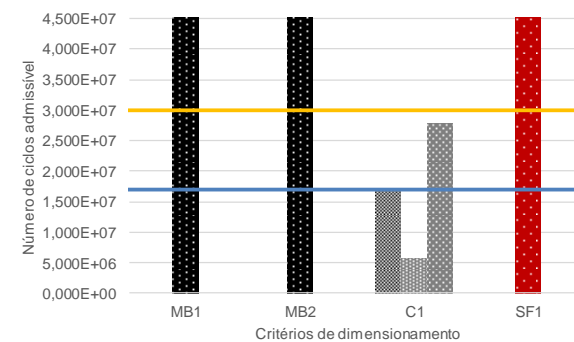
Figura II. 42 – Catálogo W5 do SATCC – base em misturas betuminosas e sub-base estabilizada com cimento - Classe de Solos S2 - Verificação estrutural realizada de acordo com a metodologia Portuguesa



a) Classe de tráfego T6

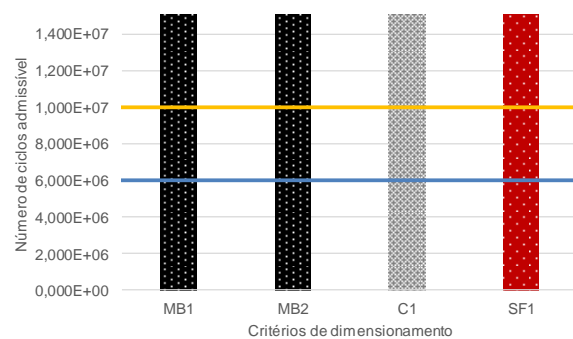


b) Classe de tráfego T7

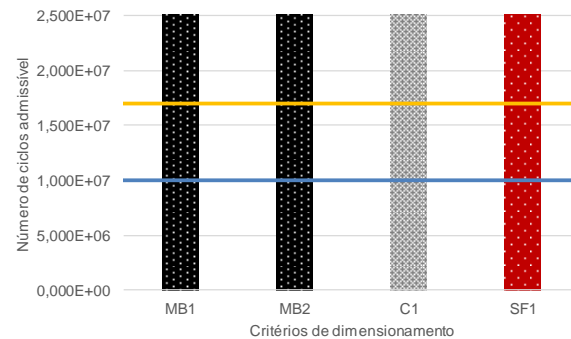


c) Classe de tráfego T8

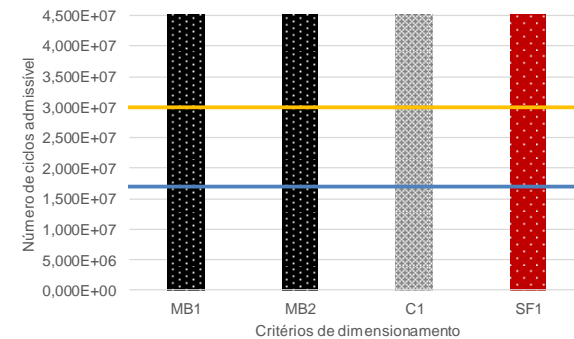
Figura II. 43 – Catálogo W5 do SATCC – base em misturas betuminosas e sub-base estabilizada com cimento - Classe de Solos S3 - Verificação estrutural realizada de acordo com o SAPEM (Categoria A)



a) Classe de tráfego T6

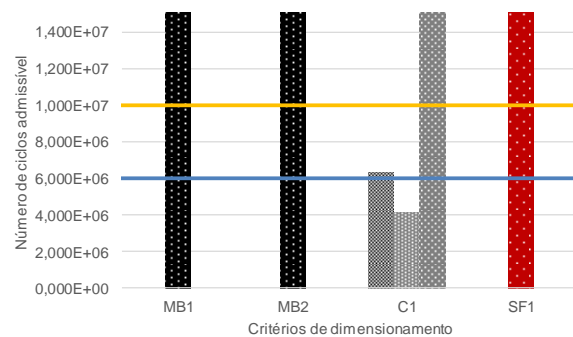


b) Classe de tráfego T7

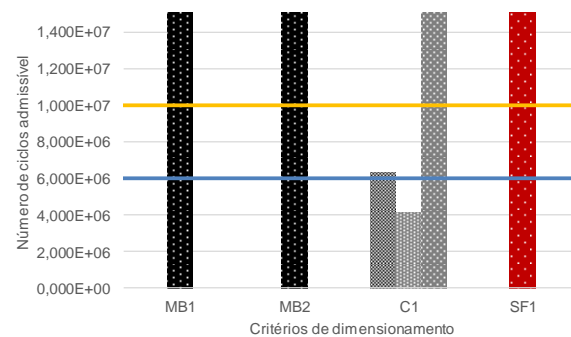


c) Classe de tráfego T8

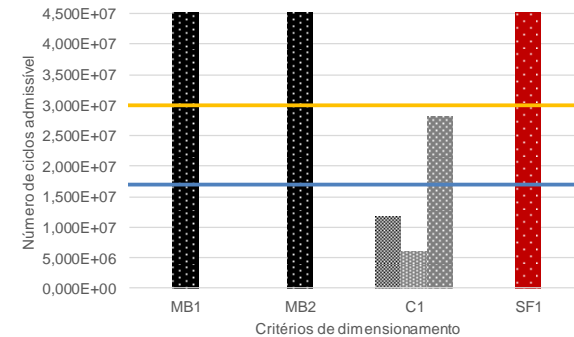
Figura II. 44 – Catálogo W5 do SATCC – base em misturas betuminosas e sub-base estabilizada com cimento - Classe de Solos S3 - Verificação estrutural realizada de acordo com a metodologia Portuguesa



a) Classe de tráfego T6

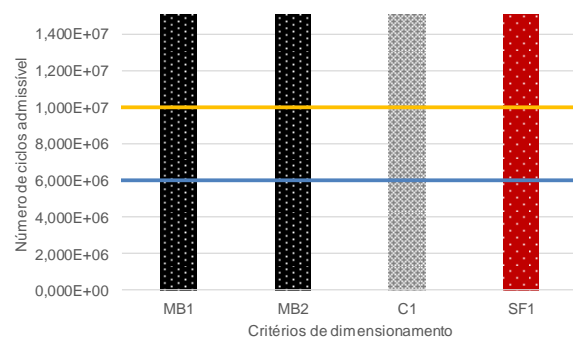


b) Classe de tráfego T7

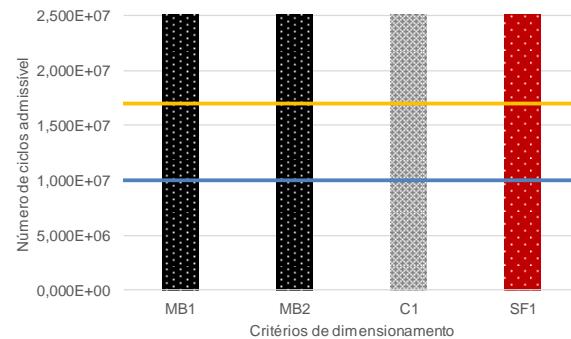


c) Classe de tráfego T8

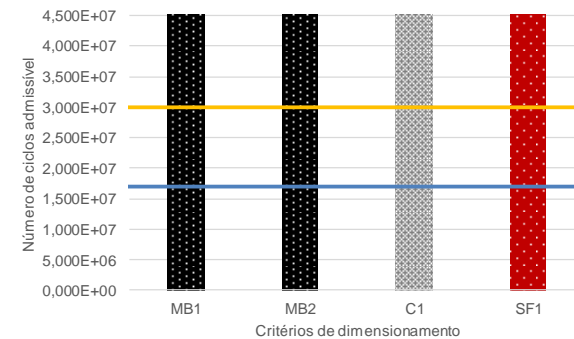
Figura II. 45 – Catálogo W5 do SATCC – base em misturas betuminosas e sub-base estabilizada com cimento - Classe de Solos S4 - Verificação estrutural realizada de acordo com o SAPEM (Categoria A)



a) Classe de tráfego T6

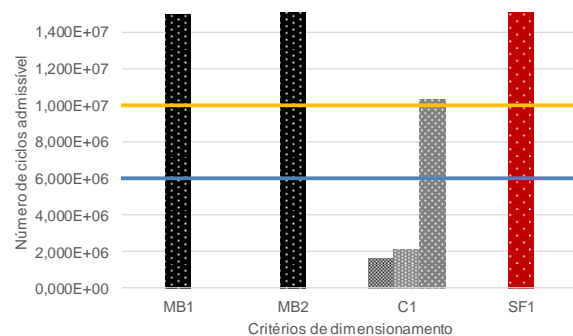


b) Classe de tráfego T7

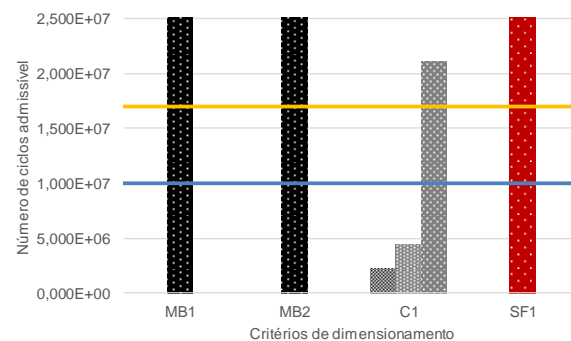


c) Classe de tráfego T8

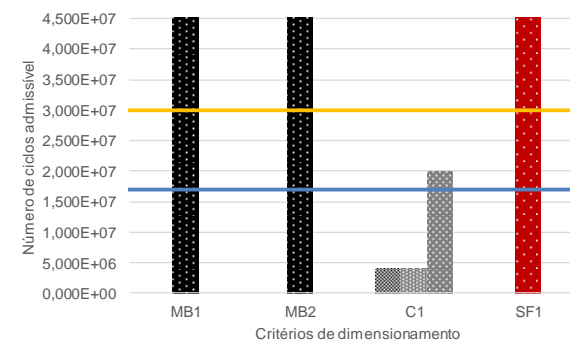
Figura II. 46 – Catálogo W5 do SATCC – base em misturas betuminosas e sub-base estabilizada com cimento - Classe de Solos S4 - Verificação estrutural realizada de acordo com a metodologia Portuguesa



a) Classe de tráfego T6

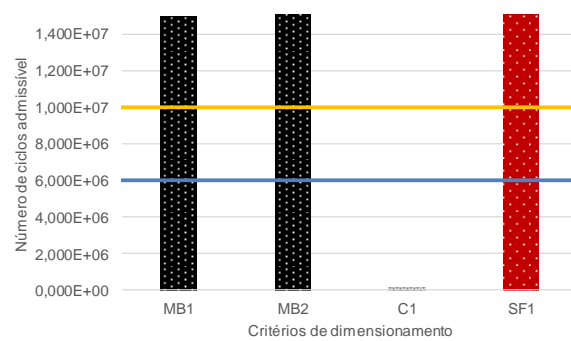


b) Classe de tráfego T7

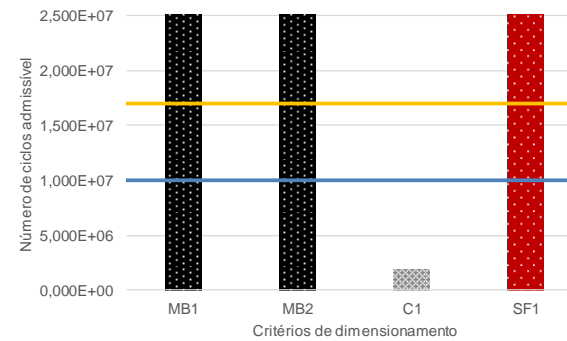


c) Classe de tráfego T8

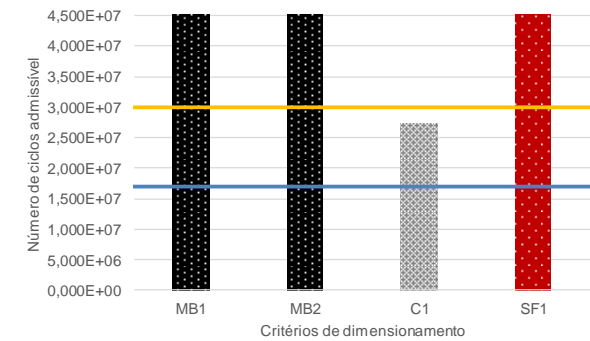
Figura II. 47 – Catálogo W5 do SATCC – base em misturas betuminosas e sub-base estabilizada com cimento - Classe de Solos S5 - Verificação estrutural realizada de acordo com o SAPEM (Categoria A)



a) Classe de tráfego T6



b) Classe de tráfego T7



c) Classe de tráfego T8

Figura II. 48 – Catálogo W5 do SATCC – base em misturas betuminosas e sub-base estabilizada com cimento - Classe de Solos S5 - Verificação estrutural realizada de acordo com o SAPEM (Categoria A)

Anexo III – Acréscimo de espessura em misturas betuminosas das estruturas do Catálogo SATCC que verificam um dimensionamento empírico-mecanicista

	T6			T7			T8		
Classe de fundação	SAPEM (2014) - D	SAPEM (2014) - A	Met. Portuguesa	SAPEM (2014) - D	SAPEM (2014) - A	Met. Portuguesa	SAPEM (2014) - D	SAPEM (2014) - A	Met. Portuguesa
S2 (CBR 3%-4%)	10,0	16,0	9,0	11,0	18,0	11,0	13,0	20,0	13,0
S3 (CBR 5%-7%)	10,0	16,0	10,0	11,0	18,0	11,0	13,0	20,0	14,0
S4 (CBR 8%-14%)	10,0	16,0	13,0	11,0	18,0	15,0	13,0	19,0	16,0
S5 (CBR 15%-29%)	15,0	21,0	18,0	16,0	23,0	19,0	18,0	24,0	21,0

Acréscimo de espessura em misturas betuminosas (cm) de modo a verificar estruturalmente o valor máximo de passagens equivalentes da classe de tráfego, adotando o valor médio de CBR da classe de fundação, um valor de temperatura de projeto de 21,4°C e uma velocidade de projeto de 50 km/h (dano máximo admissível de 100%)

Figura III. 1 – Catálogo D1 do SATCC – Acréscimo de espessura em misturas betuminosas das estruturas do catálogo SATCC de modo a verificarem o dimensionamento com base no método SAPEM (Categorias D e A) e com base na metodologia Portuguesa

Da Figura III. 1 verifica-se que, com base no manual SAPEM (SANRAL, 2014), obtiveram-se maiores acréscimos de espessura (0,16 m a 0,24 m) nas verificações estruturais realizadas para um nível de confiança de 95% e obtiveram-se menores acréscimos de espessura (0,10 m a 0,18 m) nas verificações estruturais realizadas para um nível de confiança de 50%. Com base na metodologia Portuguesa, obtiveram-se acréscimos de espessura intermédios (0,09 m a 0,21 m). Os acréscimos de espessura obtidos são significativos, indicando que a estrutura de catálogo D1 do manual SATCC (CSIR, 1998) requer um desempenho otimista dos materiais granulares e dos solos de fundação de modo a ser verificada estruturalmente com base em modelos do tipo empírico-mecanicista.

	T6			T7			T8		
Classe de fundação	SAPEM (2014) - D	SAPEM (2014) - A	Met. Portuguesa	SAPEM (2014) - D	SAPEM (2014) - A	Met. Portuguesa	SAPEM (2014) - D	SAPEM (2014) - A	Met. Portuguesa
S2 (CBR 3%-4%)	3,0	9,0	8,0	0,0	6,0	6,0	0,0	5,5	6,5
S3 (CBR 5%-7%)	5,5	11,5	9,5	2,5	8,5	7,5	2,0	8,0	7,0
S4 (CBR 8%-14%)	4,5	10,5	9,5	2,5	8,5	6,5	1,0	7,0	6,0
S5 (CBR 15%-29%)	7,0	13,0	10,0	1,5	7,5	11,0	1,0	6,0	13,0

Acréscimo de espessura em misturas betuminosas (cm) de modo a verificar estruturalmente o valor máximo de passagens equivalentes da classe de tráfego, adotando o valor médio de CBR da classe de fundação, um valor de temperatura de projeto de 21,4°C e uma velocidade de projeto de 50 km/h (dano máximo admissível de 100%)

Figura III. 2 – Catálogo D4 do SATCC – Acréscimo de espessura em misturas betuminosas das estruturas do catálogo SATCC de modo a verificarem o dimensionamento com base no método SAPEM (Categorias D e A) e com base na metodologia Portuguesa

Da Figura III. 2 verifica-se que, com base no manual SAPEM (SANRAL, 2014), obtiveram-se maiores acréscimos de espessura (0,05 m a 0,13 m) nas verificações estruturais realizadas para um nível de confiança de 95% e obtiveram-se menores acréscimos de espessura (0,0 m a 0,07 m) nas verificações estruturais realizadas para um nível de confiança de 50%. Com base na metodologia Portuguesa, obtiveram-se acréscimos de espessura intermédios (0,06 m a 0,13 m). Os acréscimos de espessura obtidos são significativos, indicando que a estrutura de catálogo D4 do manual SATCC (CSIR, 1998) requer um desempenho otimista dos materiais de pavimentação, em especial dos materiais granulares e dos solos de fundação, de modo a verificar a segurança com base em modelos do tipo empírico-mecanicista. Comparativamente aos resultados obtidos em 5.3, catálogo D1, verifica-se que a adoção de uma camada de base em misturas betuminosas reduz a necessidade de acréscimo de espessura em misturas betuminosas.

	T6			T7			T8		
Classe de fundação	SAPEM (2014) - D	SAPEM (2014) - A	Met. Portuguesa	SAPEM (2014) - D	SAPEM (2014) - A	Met. Portuguesa	SAPEM (2014) - D	SAPEM (2014) - A	Met. Portuguesa
S2 (CBR 3%-4%)	0,0	8,0	0,0	0,0	8,0	0,0	0,0	7,0	0,0
S3 (CBR 5%-7%)	0,0	8,0	4,0	0,0	6,0	0,0	0,0	7,0	0,0
S4 (CBR 8%-14%)	2,0	9,0	5,0	2,0	8,0	3,0	0,0	6,0	0,0
S5 (CBR 15%-29%)	7,0	14,0	10,0	7,0	12,0	7,0	7,0	14,0	4,0
Acréscimo de espessura em misturas betuminosas (cm) de modo a verificar estruturalmente o valor máximo de passagens equivalentes da classe de tráfego, adotando o valor médio de CBR da classe de fundação, um valor de temperatura de projeto de 21,4°C e uma velocidade de projeto de 50 km/h (dano máximo admissível de 100%)									

Figura III. 3 – Catálogo D5 do SATCC – Acréscimo de espessura em misturas betuminosas das estruturas do catálogo SATCC de modo a verificarem o dimensionamento com base no método SAPEM (Categorias D e A) e com base na metodologia Portuguesa

Da Figura III. 3 verifica-se que, com base no manual SAPEM (SANRAL, 2014), obtiveram-se maiores acréscimos de espessura (0,07 m a 0,14 m) nas verificações estruturais realizadas para um nível de confiança de 95% e obtiveram-se menores acréscimos de espessura (0,0 m a 0,07 m) nas verificações estruturais realizadas para um nível de confiança de 50%. Com base na metodologia Portuguesa, obtiveram-se acréscimos de espessura intermédios (0,0 m a 0,10 m). Verifica-se ainda que os maiores acréscimos de espessuras ocorrem para a classe S5 (CBR entre 15% e 29%). Os acréscimos de espessura obtidos são significativos, indicando que a estrutura de catálogo D5 do manual SATCC (CSIR, 1998) requer um desempenho otimista dos materiais de pavimentação, em especial dos materiais granulares e dos solos de fundação, de modo a ser verificada estruturalmente, com base em modelos do tipo empírico-mecanicista. Comparativamente aos resultados obtidos em 5.3, catálogo D1, verifica-se que a adoção de uma camada de sub-base estabilizada com cimento reduz a necessidade de acréscimo de espessura em misturas betuminosas.

	T6			T7			T8		
Classe de fundação	SAPEM (2014) - D	SAPEM (2014) - A	Met. Portuguesa	SAPEM (2014) - D	SAPEM (2014) - A	Met. Portuguesa	SAPEM (2014) - D	SAPEM (2014) - A	Met. Portuguesa
S2 (CBR 3%-4%)	5,0	11,0	4,0	3,5	10,5	3,5	3,0	10,0	3,0
S3 (CBR 5%-7%)	5,0	11,0	10,0	3,5	10,5	9,5	3,0	10,0	8,0
S4 (CBR 8%-14%)	5,0	11,0	8,0	3,5	10,5	7,5	3,0	9,0	7,0
S5 (CBR 15%-29%)	5,0	11,0	7,0	3,5	9,5	5,5	3,0	9,0	4,0
Acréscimo de espessura em misturas betuminosas (cm) de modo a verificar estruturalmente o valor máximo de passagens equivalentes da classe de tráfego, adotando o valor médio de CBR da classe de fundação, um valor de temperatura de projeto de 21,4°C e uma velocidade de projeto de 50 km/h (dano máximo admissível de 100%)									

Figura III. 4 – Catálogo W1 do SATCC – Acréscimo de espessura em misturas betuminosas das estruturas do catálogo SATCC de modo a verificarem o dimensionamento com base no método SAPEM (Categorias D e A) e com base na metodologia Portuguesa

Da Figura III. 4 verifica-se que, com base no manual SAPEM (SANRAL, 2014), obtiveram-se maiores acréscimos de espessura (0,09 m a 0,11 m) nas verificações estruturais realizadas para um nível de confiança de 95% e obtiveram-se menores acréscimos de espessura (0,03 m a 0,05 m) nas verificações estruturais realizadas para um nível de confiança de 50%. Com base na metodologia Portuguesa, obtiveram-se acréscimos de espessura intermédios (0,03 m a 0,10 m). Os acréscimos de espessura obtidos são significativos, indicando que a estrutura de catálogo W1 do manual SATCC (CSIR, 1998) requer um desempenho otimista dos materiais de pavimentação, em especial dos materiais granulares e dos solos de fundação, de modo a verificar a segurança com base em modelos do tipo empírico-mecanicista. Comparativamente aos resultados obtidos em 5.3, catálogo D1, verifica-se que, em zona húmida, o catálogo do SATCC (CSIR, 1998) foi definido com base num desempenho menos otimista dos solos de fundação e das camadas granulares.

	T6			T7			T8		
Classe de fundação	SAPEM (2014) - D	SAPEM (2014) - A	Met. Portuguesa	SAPEM (2014) - D	SAPEM (2014) - A	Met. Portuguesa	SAPEM (2014) - D	SAPEM (2014) - A	Met. Portuguesa
S2 (CBR 3%-4%)	0,0	5,0	3,0	0,0	3,5	2,5	0,0	3,0	2,0
S3 (CBR 5%-7%)	0,0	4,0	2,0	0,0	3,5	2,5	0,0	3,0	2,0
S4 (CBR 8%-14%)	0,0	4,0	2,0	0,0	3,5	1,5	0,0	2,0	1,0
S5 (CBR 15%-29%)	3,0	8,0	5,0	1,5	7,5	3,5	1,0	6,0	3,0
Acréscimo de espessura em misturas betuminosas (cm) de modo a verificar estruturalmente o valor máximo de passagens equivalentes da classe de tráfego, adotando o valor médio de CBR da classe de fundação, um valor de temperatura de projeto de 21,4°C e uma velocidade de projeto de 50 km/h (dano máximo admissível de 100%)									

Figura III. 5 – Catálogo W4 do SATCC – Acréscimo de espessura em misturas betuminosas das estruturas do catálogo SATCC de modo a verificarem o dimensionamento com base no método SAPEM (Categorias D e A) e com base na metodologia Portuguesa

Da Figura III. 5 verifica-se que, com base no manual SAPEM (SANRAL, 2014), obtiveram-se maiores acréscimos de espessura (0,35 m a 0,08 m) nas verificações estruturais realizadas para um nível de confiança de 95% e obtiveram-se menores acréscimos de espessura (0,0 m a 0,03 m) nas verificações estruturais realizadas para um nível de confiança de 50%. Com base na metodologia Portuguesa, obtiveram-se acréscimos de espessura intermédios (0,01 m a 0,05 m). Os acréscimos de espessura obtidos são relevantes, indicando que a estrutura de catálogo W4 do manual SATCC (CSIR, 1998) requer um desempenho otimista dos materiais de pavimentação, em especial dos materiais granulares e dos solos de fundação, de modo verificar a segurança com base em modelos do tipo empírico-mecanicista. Comparativamente aos resultados obtidos em 5.4, catálogo D4, verifica-se que, em zona húmida, o catálogo do SATCC (CSIR, 1998) foi definido com base num desempenho menos otimista dos solos de fundação e das camadas granulares. Comparativamente aos resultados obtidos em 5.6, catálogo W1, verifica-se que a adoção de uma camada de base em misturas betuminosas reduz a necessidade de acréscimo de espessura em misturas betuminosas.

	T6			T7			T8		
Classe de fundação	SAPEM (2014) - D	SAPEM (2014) - A	Met. Portuguesa	SAPEM (2014) - D	SAPEM (2014) - A	Met. Portuguesa	SAPEM (2014) - D	SAPEM (2014) - A	Met. Portuguesa
S2 (CBR 3%-4%)	0,0	4,0	0,0	0,0	5,0	0,0	0,0	4,0	0,0
S3 (CBR 5%-7%)	0,0	2,0	0,0	0,0	3,0	0,0	0,0	5,0	0,0
S4 (CBR 8%-14%)	0,0	4,0	0,0	0,0	4,0	0,0	0,0	6,0	0,0
S5 (CBR 15%-29%)	4,0	10,0	6,0	8,0	8,0	3,0	3,0	10,0	0,0
Acréscimo de espessura em misturas betuminosas (cm) de modo a verificar estruturalmente o valor máximo de passagens equivalentes da classe de tráfego, adotando o valor médio de CBR da classe de fundação, um valor de temperatura de projeto de 21,4°C e uma velocidade de projeto de 50 km/h (dano máximo admissível de 100%)									

Figura III. 6 – Catálogo W5 do SATCC – Acréscimo de espessura em misturas betuminosas das estruturas do catálogo SATCC de modo a verificarem o dimensionamento com base no método SAPEM (Categorias D e A) e com base na metodologia Portuguesa

Da Figura III. 6 verifica-se que, com base no manual SAPEM (SANRAL, 2014), obtiveram-se maiores acréscimos de espessura (0,02 m a 0,10 m) nas verificações estruturais realizadas para um nível de confiança de 95% e obtiveram-se menores acréscimos de espessura (0,0 m a 0,04 m) nas verificações estruturais realizadas para um nível de confiança de 50%. Com base na metodologia Portuguesa, obtiveram-se acréscimos de espessura intermédios (0,0 m a 0,06 m). Verifica-se ainda que os maiores acréscimos de espessuras ocorrem para a classe S5 (CBR entre 15% e 29%). Os acréscimos de espessura obtidos são ainda relevantes, indicando que a estrutura de catálogo W5 do manual SATCC (CSIR, 1998) requer um desempenho otimista dos materiais de pavimentação, em especial dos materiais granulares e dos solos de fundação, de modo verificar a segurança com base em modelos do tipo empírico-mecanicista. Comparativamente aos resultados obtidos em 5.5, catálogo D5, verifica-se que, em zona húmida, o catálogo do SATCC (CSIR, 1998) foi definido com base num desempenho menos otimista dos solos de fundação e das camadas granulares. Comparativamente aos resultados obtidos em 5.6, catálogo W1, verifica-se que a adoção de uma camada de sub-base estabilizada com cimento reduz a necessidade de acréscimo de espessura em misturas betuminosas.